



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METALURGIE A VLASTNOSTI MASIVNÍCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

METALLURGY AND PROPERTIES OF HEAVY STEEL CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ KUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Kubík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metalurgie a vlastnosti masivních ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Metallurgy and properties of heavy steel castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitku. V důsledku dezoxidace oceli dochází ke vzniku nekovových vměstků, jejichž chemické složení a morfologie je ovlivněna dlouhou dobou tuhnutí. Výsledné mechanické vlastnosti materiálu odlitku jsou značně ovlivňovány množstvím a typem nekovových vměstků obsažených v matici.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je u experimentálního odlitku v provozních podmínkách stanovit chemické složení a morfologii vměstků v závislosti na způsobu dezoxidace a době tuhnutí. Na základě provedených analýz následně stanovit vliv sledovaných vměstků na charakter porušování materiálu a výsledné mechanické vlastnosti.

Seznam odborné literatury:

- [1] ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevence). Brno: MATECS, 1992, 340 s.
- [2] LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. Praha: SNTL, 1984, 269 s.
- [3] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A. aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632- 9.
- [4] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A, aj. Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. Hutnické listy. 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018- 8069.
- [5] KAŇÁK, J. a SAIP, J. Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost odlitků. Slévárnictví. 1984, roč. XXXII, č. 10, s. 420 až 424.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá stanovením chemického složení a morfologie vměstků u experimentálního odlitku v provozních podmínkách slévárny ŽĐAS a.s. při dodržení optimálního obsahu vhodných dezoxidovadel v závislosti na podmínkách tuhnutí. Úvodní část práce je věnována teoretickému rozboru možných vad v odlitcích. Dále je popsán experimentální odlitek, místa odběru vzorků a jejich značení. Následně je vyhodnocena morfologie, mikroanalýza vměstků a vliv vměstků na mechanické vlastnosti a vznik vad v odlitku. Závěr obsahuje shrnutí výsledků a návrh dalšího směru ve výrobě masivních ocelových odlitků.

Klíčová slova

Vměstky, dezoxidace oceli, morfologie, vady, masivní, odlitek

ABSTRACT

The work deals with the determination of the chemical composition and morphology of inclusions in experimental casting foundry in operating conditions as ŽĐAS in compliance with the optimum content appropriate deoxidation depending on the conditions of solidification. The introductory part is devoted to theoretical analysis of possible defects in castings. We also describe the experimental casting, sampling sites and their markings. Subsequently evaluated morphology microanalysis inclusions and the effect of inclusions on the mechanical properties and the formation of defects in the casting. The conclusion summarizes the results and proposal for further direction in the production of heavy steel castings.

Key words

Inclusions, deoxidation of steel, morphology, defects, massive, casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBÍK, Jiří. *Metalurgie a vlastnosti masivních ocelových odlitků: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 65 s., Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Metalurgie a vlastnosti masivních ocelových odlitků vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 22. 5. 2013

.....

Jiří Kubík

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
1 ÚVOD	9
1.1 Cíle diplomové práce	9
2 VÝROBA ODLITKŮ SLÉVÁRNY ŽDAS a. s.....	10
2.1 Historie	10
2.2 Výrobní program slévárny	10
2.3 Výrobní zařízení	10
2.3.1 EOP (Elektrická oblouková pec).....	11
2.3.2 LF (Ladle Furnace) – Pánvová pec	11
2.3.3 VD (Vacuum Desassing) / VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) ...	11
3 VADY ODLITKŮ.....	13
3.1 Rozdělení vad odlitků.....	13
3.2 Vměstky.....	14
3.2.1 Morfologie vměstků.....	15
4 DEZOXIDACE OCELI	19
4.1 Dezoxidace hliníkem	19
4.2 Dezoxidace křemíkem.....	20
4.3 Dezoxidace titanem.....	21
4.4 Dezoxidace vápníkem	21
4.5 Dezoxidace lantanidy	22
5 LASTUROVÝ LOM.....	23
5.1 Teorie lasturových lomů.....	23
5.2 Vznik a výskyt lasturových lomů.....	23
5.3 Shrnutí a opatření proti vzniku lasturových lomů.....	24
6 POPIS EXPERIMENTU.....	25
6.1 Experimentální odlitek.....	25
6.2 Popis technologie výroby a simulace plnění, chladnutí a tuhnutí.....	26
6.3 Způsob značení vzorků.....	27
6.4 Místa odběru vzorků.....	29
7 METODY HODNOCENÍ ODLITKŮ.....	30
7.1 Metalografické hodnocení.....	30
7.1.1 Příprava vzorků.....	30
7.1.2 Metalografické hodnocení vzorků o tloušťce 20 mm	31
7.1.3 Vyhodnocení metalografického hodnocení vzorků.....	33
7.2 Mikroanalýza vměstků	33
7.2.1 Analýza vzorků dezoxidovaných Al.....	33
7.2.2 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al.....	39
7.2.3 Analýza vzorků dezoxidovaných Al + Zr	40
7.2.4 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al+Zr.....	45
7.2.5 Analýza vzorků dezoxidovaných Al + Ti.....	46
7.2.6 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al+Ti.....	49
7.3 Hodnocení lomové plochy po tahové zkoušce.....	49
7.3.1 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al	49

7.3.2 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al + Zr....	52
7.3.3 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al + Ti....	54
7.3.4 Vyhodnocení lomových ploch po tahové zkoušce.....	56
7.4 Hodnocení délky trhlin a mechanických vlastností.....	56
7.4.1 Výsledky hodnocení délky trhlin a mechanických vlastností.....	56
7.4.2 Shrnutí a vyhodnocení délky trhlin a mechanických vlastností.....	60
Závěr	62
Seznam použitých zdrojů	63

1 ÚVOD

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitků. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje zvláštní pozornost věnovat nejen metalurgii kovu, výrobě forem a slévárenské technologii, ale i možnostem řízení krystalizace a odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí [1], [2].

Vady odlitků jsou mimo jiné konečným důsledkem nedokonalých a zastaralých technologií, nekázně i nedodržení příslušných výrobních postupů a nízké úrovně organizace a řízení ve slévárně. Kromě ztrát zisku způsobují vady odlitků i mnohé nedorozumění mezi zákazníkem a dodavatelem, která mohou vést ke ztrátě trhu [2].

Vady odlitků oceli způsobené metalurgií, anebo jednodušeji „metalurgické vady“, jsou ve svém důsledku nežádoucí a nepříjemný problém, který značně komplikuje plynulost výroby oceli i odlitků. Kromě ekonomických ztrát jsou také příčinou četných nedorozumění mezi pracovníky zajišťujícími výrobu odlitků vzhledem k tomu, že téměř každá vada je výsledkem mnoha příčin, jejichž podíl na konečné zmetkovitosti je možno obvykle rekonstruovat jen s jistou pravděpodobností. S takovouto pravděpodobností jsou také spojeny obtíže při hledání cest, jak vzniku vad předcházet během výroby [3].

Diplomová práce je dílčí součástí projektu TIP č. FR-TI1/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků, řešeného ve slévárně oceli ŽĐAS a.s., Žďár nad Sázavou ve spolupráci s VUT Brno. Tento projekt měl za cíl optimalizaci výroby masivních odlitků, snížení ekonomických důsledků vad a zvýšení využití množství kovu. Dále bylo cílem formulovat opatření na snížení ztrát způsobených vadami a po ověření návrhu na reálných odlitcích stanovit návrh nové optimalizované technologie [4].

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je u experimentálního odlitku v provozních podmínkách stanovit chemické složení a morfologii vměstků v závislosti na způsobu dezoxidace a době tuhnutí. Na základě provedených analýz následně stanovit vliv sledovaných vměstků na charakter porušování materiálu a výsledné mechanické vlastnosti.

2 VÝROBA ODLITKŮ SLÉVÁRNY ŽĐAS a. s.

Akciová společnost ŽĐAS se sídlem ve městě Žďár nad Sázavou zahájila svoji výrobu před více než 60 lety. V současné době má cca 2500 zaměstnanců a objem výroby za rok 2007 představoval cca 150 milionů eur. Slévárna zaměstnává cca 250 pracovníků. ŽĐAS patří do skupiny firem Železiarne Podbrezová Group, jejímž lídrem je přední světový výrobce trubek ŽP a.s. Podbrezová, Slovenská republika [5].

2.1 Historie

První písemné zprávy o výrobě železa na Žďársku se datují do počátku 15. století. V polovině 19. století byl zahájen provoz železářny v obci Polníčka, nacházející se asi 10 km od Žďáru, kde se vyráběly a vyvážely hutnické a strojírenské výrobky do celé Evropy. Avšak 50 let poté z důvodu krize došlo k ukončení výroby a zániku hutnictví v Žďárském regionu. V roce 1951 byla zahájena výroba v největším podniku na českomoravské vysočině, dříve státnímu podniku. V roce 1992 došlo k privatizaci a vzniku ŽĐAS, a.s. V roce 2002 vstupuje strategický partner a majoritní vlastník, slovenská firma Železiarne Podbrezová, a.s. [6].

2.2 Výrobní program slévárny

Výrobní program firmy ŽĐAS, a.s. je zaměřen na výrobu tvářecích strojů, kovacích lisů, zařízení na zpracování šrotu, zařízení na zpracování válcovaných výrobků, odlitků, výkovků, ingotů a nástrojů, především pro automobilový průmysl. V současné době je výrobní program směřován k tvarově a materiálově náročným odlitkům s programovou podporou MAGMA v hmotnostních skupinách od 200 kg do 40 000 kg hrubé hmotnosti odlitku a maximálních rozměrech 8500 x 4800 x 3000 mm. Odlitky slouží zejména potřebám energetického průmyslu. Roční produkce odlitků se pohybuje kolem 9000 tun. Roční kapacita ocelárny je 60 tis. tun oceli. Vyrobená ocel je odlévána buď do kokil (ingoty) nebo do forem (odlitky). Výrobní sortiment zahrnuje širokou škálu značek ocelí od konstrukčních, nízko a středně legovaných včetně nástrojových ocelí až po vysokolegované (Cr, Ni, Mn), austenitické a speciální oceli pro letecký průmysl a energetiku [5].

2.3 Výrobní zařízení

Výroba je realizována na třech elektrických obloukových pecích (EOP), jedné pánvové peci (LF) a na zařízení pro hlubokou dezoxidaci a odplynění oceli ve vakuu s možností vakuového oduhličování vysokolegovaných chromových tavenin (VD/VOD) [5].

2.3.1 EOP (Elektrická oblouková pec)

Elektroocelárna je vybavena třemi EOP. Jsou to výrobky firmy Siemens-Elin Union. Výrobní kapacity těchto tavicích agregátů jsou uvedeny v *tab. 2.1* EOP využívají elektromechanické regulace pohybu elektrod. Tyto agregáty byly postupem času výrazně modernizovány. EOP č. 2 a EOP č. 4 jsou vybaveny technologií mezitavbové opravy struskových čar za tepla (tokretování). EOP č. 2 je vybavena dvojicí excentricky uložených kamenů, které mohou dmýchat řízeně dusík, případně argon, do nístěje pece [7], [8].

Tab. 2.1 Kapacity EOP [5].

Tavicí agregát	Kapacita	Výkon transformátoru	Průměr elektrod
EOP č. 2	16 - 22 tun	7,5 MW	350 mm
EOP č. 3	4 - 8 tun	3,7 MW	250 mm
EOP č. 4	12 – 19 tun	7,5 MW	350 mm

2.3.2 LF (Ladle Furnace) – Pánvová pec

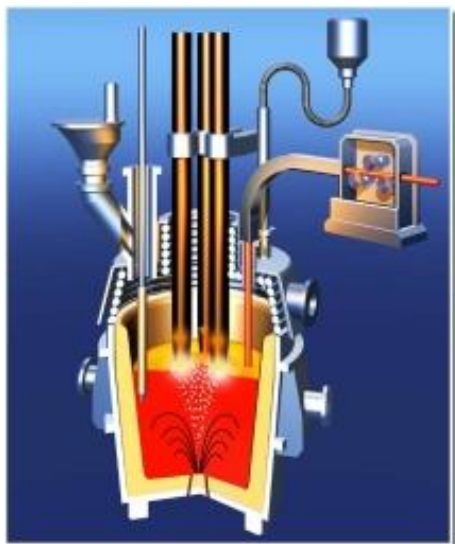
V elektroocelárně je situována taktéž pánvová pec (*obr. 2.1*), která vznikla přestavbou původní EOP č. 1. Na této pánvové peci lze tavit tavbu o hmotnosti 15 – 23 tun. Transformátor o výkonu 7,5 MW byl použit z původní EOP č. 1, ale byl omezen výkon na max. 3,5 MW, aby při použití elektrod o průměru 250 mm bylo dosaženo ohřevu 3 – 4 °C/min. Vodou chlazené víko dodala firma FUCHS G.m.b.H. Po úroveň hladiny kovu jsou pánve vyzděny žárobetonem, nad úrovní hladiny kovu se nachází vyzdívka z vysokouhlíkatého magnezitu. Pánve jsou osazeny šoupátkovými uzávěry. Přesunem redukční fáze tavby na zařízení pánvové pece došlo ke zkrácení doby tavby na EOP cca o 40 min na současných cca 160 min. Doba tavby na LF se pohybuje od 40 do 120 min. Při ukončení zpracování na LF se obsah vodíku pohybuje od 4 do 5 ppm, obsah dusíku v tavenině se pohybuje kolem 80 ppm [7], [8], [9]. Pánvová pec (LF) je rovněž základním článkem mezi tavicím agregátem a technologickými procesy zpracování ve vakuu [10].

2.3.3 VD (Vacuum Desassing) / VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation)

Elektroocelárna je vybavená zařízením pro vakuové zpracování oceli kesonového typu (VD - *obr. 2.2*). Zařízení VD umožňuje i oxidační vakuové oduhličení vysokolegovaných ocelí (VOD - *obr. 2.3*). VOD proces se používá obvykle pro výrobu vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí s nízkým obsahem uhlíku. VD/VOD pracují v součinnosti s pánvovou pecí. Zařízení dodala firma Mannesmann-Demag-MESSO. Zařízení se skládá z pevného kesonu a pojízdného víka kesonu. Tavby mají hmotnost od 12 do 18 tun [7], [8], [9].

Pro dosažení hlubokého vakua (pod 200 Pa za 4 minuty) se používá 6 paroproudých vývěv, které jsou osazeny Lavalovou dýzou. U procesu VOD je použita ultrasonická tryska s výstupní rychlostí plynného kyslíku cca 2 Machy s maximálním průtokem až 500Nm³h⁻¹. Běžně dosahované hodnoty času VD

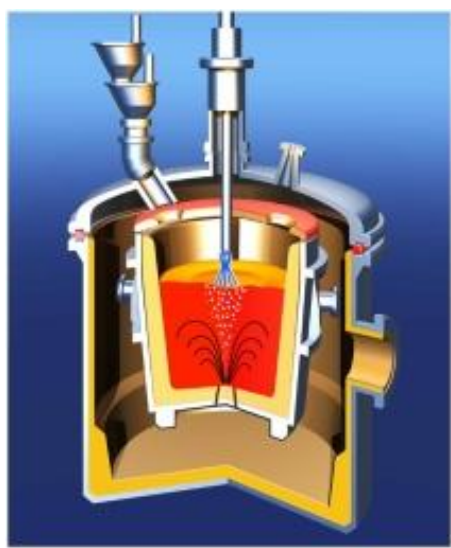
procesu je 28min a VOD procesu 110min. Mezní hodnoty se pohybují kolem 22 minut u VD, respektive 95 minut u VOD. Použitím těchto procesů se může koncentrace plynů výrazně snížit. Běžně se dosahuje 1,3ppm vodíku a cca 40ppm dusíku. Lze dosáhnout i obsahu síry 10ppm, což už je rozlišovací schopnost měření. Hodnoty koncentrací plynů a síry závisí na vyráběné značce oceli [7], [8], [11].



Obr. 2.1 Princip pánvové pece [12].



Obr. 2.2 Princip metody VD [13].



Obr. 2.3 Princip metody VOD [14].

Přesný poměr podílu odlitků vyráběných na EOP, LF, VD ve slévárně oceli ŽĐAS a.s. Žďár nad Sázavou, není možno přesně stanovit. Volba mezi EOP a LF případně VD je dána požadavky na mechanické vlastnosti nebo velikostí nálitku. U masivních nálitků o průměru 800 mm a výše je pro dosažení nižších obsahů síry volena LF a pro dosažení nižších obsahů plynů VD. VOD je standardně využíváno pro vysokolegované oceli (korozi-vzdorné, Cr-Ni, austenitické, duplexní). Materiály ze sekundární metalurgie vykazují především vyšší vrubovou houževnatost a nižší přechodovou teplotu.

3 VADY ODLITKŮ

Termínem „vada“ kovového materiálu se obecně označuje nedokonalost, která má původ přímo ve výrobním procesu polotovaru nebo hotové součásti. Vada zaviněna metalurgií, nebo stručněji metalurgická vada ocelového odlitku, je z tohoto hlediska vada, která je důsledkem nedostatků v metalurgii výroby oceli, popřípadě odchylek od standardního průběhu jednotlivých fází tavby, nebo tepelného zpracování. Je nutné si uvědomit, že ani ten nejdokonalejší metalurgický a technologický postup nezaručí výrobu ocelových odlitků bez vzniku vad [3].

Výroba masivních odlitků je zdoluhavý proces, na jehož realizaci se podílí velké množství pracovníků. Kvalifikovanost a zkušenost těchto pracovníků se určitým dílem podepíše na vzniku vad při výrobě odlitků. Vady mohou vznikat jako nepřímý důsledek lidského jednání, jako jsou návrhy technologických postupů, metalurgické zpracování taveniny, příprava formovacích směsí, aj. Mohou ale také vzniknout přímo, chybou příslušného odpovědného pracovníka, například neopatrným sestavováním či rozebíráním forem. Nedá se však říci, že na vznik vad má vliv jenom lidský faktor. Na jejich vzniku se podílí mnoho jiných podnětů. Mezi ně lze zařadit např. i počasí a s ním spojenou rozdílnou vlhkost vzduchu v ročních obdobích. Tento parametr se projeví i při chladnutí masivních odlitků, kdy se doba chladnutí nepohybuje v hodinách, ale ve dnech [15].

3.1 Rozdělení vad odlitků

Každý druh či typ odlitku je určen k jiným pracovním účelům. Spolu s těmito funkčními účely jsou spjaty i rozdílné funkční vady. Vada, která je pro nějaký typ odlitku nepřijatelná, může být pro jiný typ odlitku zcela přijatelná. Podle tohoto kritéria jsou vady podle autorů [2] rozděleny do několika základních skupin:

- Zjevné vady – tyto vady lze zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku, obvykle stačí prohlídka prostým okem pracovníka.
- Skryté vady – tyto vady lze zjistit až po obrobení odlitku, případně použitím speciálních kontrolních a měřících metod a přístrojů.

Z hlediska jakosti vady odlitku bývá toto základní rozdělení vad ještě doplněno o vady přijatelné, nepřijatelné, opravitelné a odstranitelné [2].

- Přijatelné vady – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které tyto dokumenty povolují.
- Nepřijatelné vady – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které tyto dokumenty nepovolují (zakazují).

- Opravitelné vady – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem,

jejichž oprava vhodným způsobem (tzn. zavaření, vyžihání aj.) je podle sjednaných podmínek, či platných norem dovolena.

- Odstranitelné vady - jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které lze po dohodě s odběratelem odstranit. Jedná se o zvláštní způsoby oprav, které původní technologický postup nepředpokládá (např. nepředepsané tepelné zpracování aj.).

U masivních ocelových odlitků se většina závažných vad odlitků, které při výrobě vznikají, řadí do druhé kategorie, tzn. skryté vady. K jejich zjištění se z větší části využívají nedestruktivní metody zkoušení, které nenarušují odlitek. Zde lze využít metodu rentgenu, využití této metody je však limitováno tloušťkou stěny odlitku. Proto je při zkoušení masivních odlitků využívána spíše metoda s použitím ultrazvuku, která není tolik limitována tloušťkou stěny odlitku. Tato metoda je však závislá na struktuře zkoušeného odlitku. Ultrazvuk lze s určitou přesností zkoušky tedy využít především u materiálu s jemnozrnnou strukturou [15].

3.2 Vměstky

Vměstky v oceli jsou příčinou nebezpečných a závažných vad materiálů. Nekovové vměstky jsou tvořeny zejména sulfidy nebo oxidy a vznikají v průběhu procesu tavení, odlévání a chladnutí a tuhnutí odlitku. Všechny druhy ocelí obsahují do menší nebo vyšší míry nekovové vměstky. Druh a vzhled těchto nekovových vměstků závisí na faktorech, jako jsou druh oceli, proces tavení, metalurgické zpracování a rozsah tvarování, kterým ingot nebo licí pramen prochází za účelem dosažení hotového výrobku. Vměstky mohou mít různý původ a mohou se do taveniny dostávat v celém procesu tavení a odlévání tekutého kovu. Významný vliv na složení oxidických ale i sulfidických vměstků má také dezoxidace oceli. V závislosti na druhu dezoxidačního prvku se mění chemické složení i morfologie vměstků. Množství vměstků souvisí především s metalurgickým zpracováním, podmínkami odlévání a slévarenskou technologií a konstrukcí odlitku [16].

Popis vady:

Mikročistota, která neodpovídá požadavkům norem a sjednaným technickým přejímacím podmínkám. Pod pojmem mikročistoty se zahrnuje vyjádření množství (objemového, popř. plošného), počtu, velikosti, tvaru a rozložení vměstků různého chemického složení [1]. V případě ocelových odlitků

nebývá vždy mikročistota vyžadována. Nevhodně nebo ve větším množství vyloučené vměstky však mohou iniciovat také pokles mechanických vlastností, zejména plastických vlastností, ale mohou i usnadňovat šíření trhlin. I když tedy nemusí u odlitku být mikročistota vyžadována, je nutné se problematikou vměstků u ocelových odlitků zabývat.

Příčina vzniku vady:

Při posuzování příčin nadměrného znečištění ocelí vměstky je třeba vycházet z jejich původu. Podle autora [1] jsou rozděleny na:

- Exogenní vměstky - Do oceli jsou vnášeny působením okolního prostředí, mohou pocházet z reakcí mezi tekutou ocelí a struskou, žáruvzdornými a formovacími hmotami a vznikat též následkem reoxidačních procesů. Nejčastěji mají makroskopické rozměry.
- Endogenní vměstky – Jsou to nekovové částice, které vznikají během odlévání a tuhnutí následkem poklesu rozpustnosti síry, kyslíku a dusíku v železe během tuhnutí odlitků, a to chemickými reakcemi uvedených prvků s prvky přítomnými v železe i s železem samotným. Hlavní část těchto vměstků vzniká během závěrečné dezoxidace oceli.

3.2.1 Morfologie vměstků

Příčiny vzniku vady:

Nekovové vměstky v nelegovaných až vysokolegovaných ocelích jsou všeobecně produktem metalurgické fáze výroby oceli. Tyto vměstky jsou tvořeny oxidy, sulfidy a nitridy. Jejich vznik je možný přímo v tavenině bez přítomnosti pevné fáze, tj. nad teplotou likvidu. Velká část těchto vměstků může vyplouvat do strusky. Hlavní část těchto vměstků vzniká během závěrečné dezoxidace oceli, dále během odlévání a tuhnutí jak nad teplotou likvidu, tak mezi likvidem a solidem tuhnoucí slitiny [1], [17].

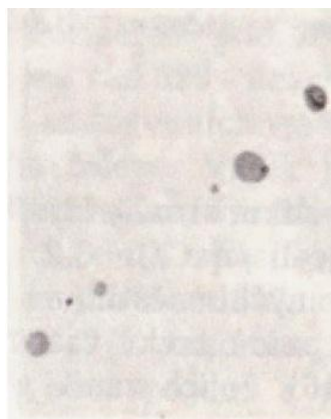
Rozdělení nekovových vměstků:

Rozdělení vměstků je nejčastěji prováděno na základě morfologie – tvaru a homogenity vměstků.

- I. typ vměstků:

Je tvořen komplexními oxysulfidickými vměstky globulárního tvaru, náhodně rozložených v základní kovové hmotě. Vměstky prvního typu se vyskytují v neuklidněných ocelích. Při výrobě oceli na odlitky se mohou vyskytnout vměstky I. typu v tavných nedostatečně dezoxidovaných, ve kterých

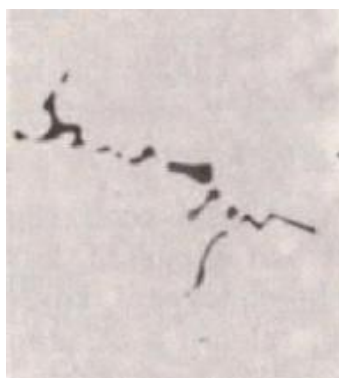
se obvykle vyskytují také bubliny CO. První typ vměstků se může vyskytnout i v dobře dezoxidovaných ocelích v některých místech odlitku jako důsledek reoxidace oceli během plnění dutiny formy kovem. Na chemickém složení těchto vměstků se podílí hlavně mangan, křemík, síra, kyslík a v nepatrné míře hliník. Jejich vznik je podmíněn vysokým obsahem aktivního kyslíku, nízkými obsahy hliníku (pod 0,01%) a uhlíku (pod 0,1%) [1], [17].



Obr. 3.1 Vměstky I. typu [1].

- II. typ vměstků:

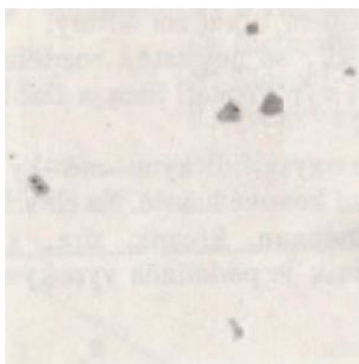
Při obsahu cca 0,020 až 0,025 % Al a pod 0,2 % C vzniká II. typ vměstků. Jsou to sulfidy manganu a železa často doprovázené oxidy Al_2O_3 , které mohly sloužit jako krystalizační zárodky. Oxid hlinitý tvoří hranaté vměstky a roste přímo z taveniny i při teplotách mnohem vyšších, než je teplota likvidu. Rozpustnost síry v rostoucích dendritech feritu nebo austenitu je menší než v tavenině. Tavenina mezi dendrity se proto obohacuje o síru. Když je tavenina v mezidendritických prostorech nasycena sírou, vyloučí se síra jako sulfid manganu. Přítomnost sulfidů II. typu snižuje výrazně hodnoty houževnatosti, příp. kontrakce, méně hodnoty tažnosti [1], [18].



Obr. 3.2 Vměstky II. typu [1].

- III. typ vměstků:

Je tvořen převážně sulfidy manganu obsahující někdy oxidické jádro oxidu hlinitého, které se vyznačují polygonálním hranatým tvarem a jsou náhodně rozloženy v základní kovové hmotě - *obr. 3.3* [7]. Jejich vznik je podmíněn vyšším obsahem uhlíku a manganu.



Obr. 3.3 Vměstky III. typu [1].

- IV. typ vměstků:

Je tvořen shluky velmi jemných vměstků na bázi oxidu hlinitého při dezoxidaci hliníkem, nebo na bázi oxidů prvků vzácných zemin, jestliže bylo k dezoxidaci použito KVZ. Jejich vznik je podmíněn nízkým obsahem aktivního kyslíku a přebytky dezoxidačních prvků např. Al, KVZ aj. Vyskytují se v ocelích s obsahem uhlíku nad 0,40% a obsahem hliníku nad 0,060% [1], [18].



Obr. 3.4 Vměstky IV. typu [1].

Jak ukazují výsledky práce [17], IV. typ vměstků se může vyskytovat nejen v ocelích s vyšším obsahem Ce, ale také i Zr nebo Mg.

- Vměstky I. b typu:

Zavedením vměstků typů „b“ byla Bůžkem zpřesněna Simsova klasifikace. Zpřesnění spočívá v tom, že rozdílné chemické složení od klasického vměstku je rozlišitelné podle odlišného zbarvení při zachování tvaru vměstku [10]. Běžně se toto porovnávání barev neprovádí a zkoumá se pouze tvar vměstku. Vměstky I. b typu jsou kulovité vměstky, které jsou odlišné od vměstků I. typu chemickým složením. Vznikají zejména po modifikaci vměstků pomocí Ca. Při modifikaci dochází k přeměně vměstků II. a III. typu na kulovité vměstky. V porovnání s II. a

III. typem způsobí I. b typ lepší mechanické vlastnosti, zejména lepší houževnatost a plastické vlastnosti. Kulovitého tvaru vměstku se požaduje tam, kde je potřeba snížit tranzitní teplotu oceli, tzn. oceli pro práci za teplot až - 60°C. Tyto vměstky také vznikají dezoxidací pomocí Al + KVZ [2], [19].

Opatření k zabránění vzniku a odstranění vady:

Tvorba endogenních vměstků je průvodním jevem metalurgického procesu výroby slitin železa. Vznik jistého typu endogenních vměstků je v hlavní míře určen závěrečnou dezoxidací oceli v pánvi, avšak významně se na formování vměstků podílí způsob, jakým je při tavení oceli v zásadité elektrické obloukové peci vedeno redukční údobí, a to jak předběžná, tak zejména závěrečná dezoxidace oceli [1].

Jako nejvíce škodlivé se jeví sulfidické vměstky II. typu, které jsou spojeny s poklesem plastických vlastností oceli, tažnosti a zvláště kontrakce, a též se snížením vrubové houževnatosti. V silnostěnných odlitcích zvyšují sklon k trhlinám i prasklinám. Po dezoxidaci hliníkem se přidává do oceli vápník. V důsledku modifikace vznikají oxisulfidy obsahující mimo kyslík, síru dále mangan, křemík, hliník a vápník. Cílem modifikace je změnit vměstky na typ I. b, který má nejmenší vliv na plastické vlastnosti oceli [1], [17].

Zvláštní skupinu vměstků tvoří kovové vměstky, jejich výskyt je však méně častý. Jsou to obvykle nerozpuštěné kovové přísady. Nejčastěji špatně rozpuštěná očkovačla nebo legury, přidávané do proudu kovu. K nedokonalému rozpuštění dochází často v případech, kdy se kovová přísada obalí vrstvou strusky. Původ kovových vměstků bývá obvykle snadno identifikovatelný [20].

4 DEZOXIDACE OCELI

Dezoxidace oceli v peci znamená snížení aktivity kyslíku v oceli i strusce na hodnotu, která je vyhovující pro odsíření, dolegování oceli a závěrečnou dezoxidaci v pánvi.

Používané způsoby technologie je možné rozdělit podle [2] na:

- srážecí
- extrakční dezoxidaci
- dezoxidaci syntetickými struskami
- dezoxidaci za sníženého tlaku (ve vakuu)

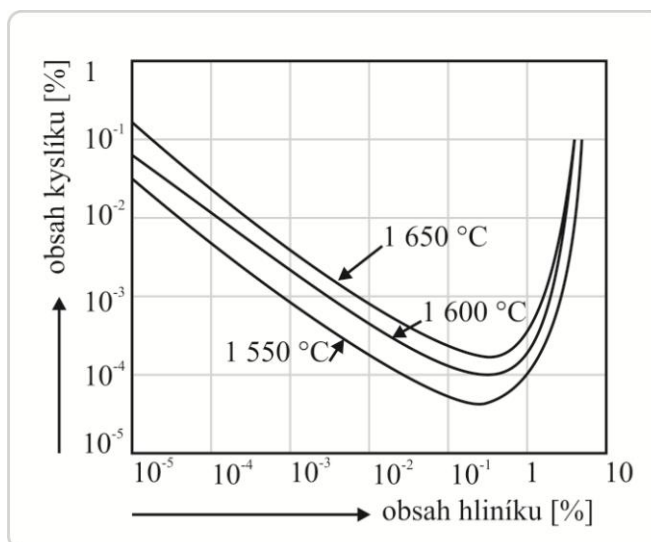
Srážecí dezoxidace:

Ke srážecí dezoxidaci se používá při výrobě oceli na odlitky nejčastěji křemík ve formě ferosilicia (75% Si) a hliník ve formě hliníkových housek. Dezoxidace Si a Al může být kombinována s použitím dalších prvků jako Ti, Ca, KVZ aj. [2].

4.1 Dezoxidace hliníkem

V ocelích na odlitky se používá hliník ke srážecí dezoxidaci v peci a k závěrečné dezoxidaci v pánvi. Po dezoxidaci hliníkem v pánvi se požaduje v oceli koncentrace hliníku vyšší než cca 0,030%. Při této koncentraci hliníku se sníží aktivita kyslíku tak, že během tuhnutí je zabráněno uhlíkové reakci v odlitcích a vzniku bublin (bodlin). Zbytková koncentrace hliníku (zbytkový hliník) dezoxiduje ocel během sekundární oxidace a brání zvýšení aktivity kyslíku v oceli během odlévání a plnění dutiny formy [2], [21].

Při dostatečném obsahu zbytkového hliníku (více než cca 0,030% Al) je produktem dezoxidace v ocelích na odlitky oxid hlinitý [2].



Obr. 4.1 Rovnovážné obsahy [Al] a [O] v tavenině železa při teplotě 1550 až 1650 °C [21].

Hliník v tavenině i v oceli po ztuhnutí existuje jednak ve formě oxidu Al_2O_3 , jednak rozpuštěný v roztoku. Pod teplotou likvidu se také část hliníku váže na nitrid AlN . Obsah hliníku se proto udává jako hliník celkový $\text{Al}_{\text{celk.}}$ nebo jako hliník rozpuštěný v roztoku $[\text{Al}]$. Celkový hliník je dán součtem hliníku rozpuštěného v oceli $[\text{Al}]$, a hliníku vázaného na kyslík $\text{Al}_{\text{ox.}}$ a dusík $\text{Al}_{\text{nit.}}$ [2], [17].

Po dezoxidaci hliníkem se obsahy kyslíku prakticky rovnají aktivitám. Na oxidy bývá vázáno v oceli cca 0,003 až 0,005% Al. Rozdíl mezi obsahem hliníku rozpuštěným a vázaným na oxidy odpovídá množství oxidických vměstků a je možné jej považovat za míru oxidické čistoty oceli. Moderní spektrální analyzátoři (kvantometry) umožňují stanovení hliníku rozpuštěného $[\text{Al}]$ i celkového [2].

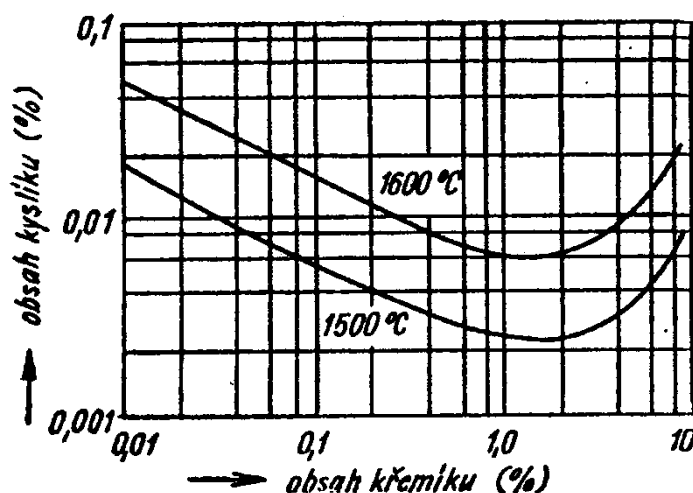
K dezoxidaci se používají hliníkové housky, případně odpadní hliník. U ocelí na odlitky se používá téměř vždy závěrečná dezoxidace hliníkem v pánvi. Hliník plave na hladině oceli a je ve styku s atmosférou. Proto je při dezoxidaci hliníkovými houskami propal hliníku 40% až 70%. Snížení rozptýlů výsledných obsahů hliníku se dosáhne některým ze způsobů ponořování hliníku pod hladinu kovu nebo použitím ferohliníku. Z těchto postupů dává nejlepší výsledky injektaž hliníkového drátu. Používají se také hliníkové kroužky zaklínované na zátkovou tyč, případně se hliníkové housky zakovávají na ocelovou tyč [2], [17].

Obsah hliníku je nutno řídit v poměrně úzkém rozmezí z důvodu možného výskytu lasturových lomů (zejména u masivních odlitků) [22], [23].

Spodní hranice obsahu zbytkového hliníku je dána požadavkem na zabránění vzniku uhlíkové reakce po celou dobu odlévání a tuhnutí odlitku. Horní obsah zbytkového hliníku je limitován nebezpečím vzniku lasturových lomů, snížením mechanických vlastností jako je tažnost, vrubová houževnatost, a možným zhoršením obrobiteľnosti [22], [23].

4.2 Dezoxidace křemíkem

Zjednodušeně je možné popsat dezoxidaci křemíkem rovnicí $[\text{Si}] + 2[\text{O}] = \text{SiO}_2$ [2], [21]. V ocelích na odlitky bývá předepsán obsah křemíku do 0,5 až 0,6%. Pro uvedenou koncentraci křemíku je možné z diagramu uvedeném na *obr. 4.2* odečíst rovnovážnou koncentraci kyslíku při teplotě 1600°C 60 až 80 ppm [21].



Obr. 4.2 Koncentrace kyslíku při 1600°C [21].

V rovnováze s uhlíkem u běžného sortimentu ocelí se nacházejí aktivity kyslíku 40 až 120 ppm. Křemík je pro ocel na odlitky slabý dezoxidační prvek. Dezoxidace křemíkem nezaručuje zdravé ocelové odlitky bez bublin. [2], [21].

Produktem dezoxidace křemíkem jsou křemičitany, jejichž složení závisí na obsahu uhlíku, manganu a křemíku v oceli. Výskyt tekutých křemičitanů ve vyrobených odlitcích během tuhnutí bývá znamením nedostatečné dezoxidace oceli nebo sekundární oxidace oceli během odlévání a proudění ve formě. K dezoxidaci křemíkem se používá ferosilicium nejčastěji s obsahem Si=75%. Takové ferosilicium má nízkou měrnou hmotnost, rozpouští se na hladině oceli. [2].

4.3 Dezoxidace titanem

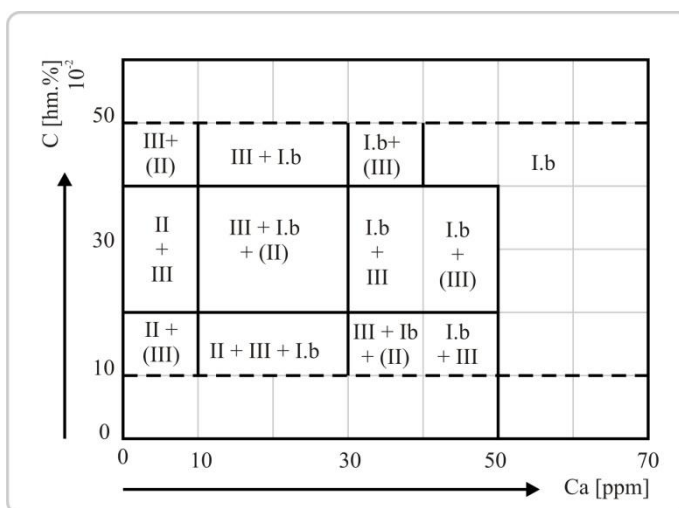
Složení oxidů titanu po dezoxidaci závisí na obsahu titanu v oceli [21]. Do cca 0,10% Ti vzniká oxid Ti_3O_5 (obr. 4.2). Při vyšších koncentracích titanu vzniká oxid typu Ti_2O_3 . Titan má silnější dezoxidační účinek než křemík, ale slabší než hliník [2], [18]. V ocelích se uplatňuje především titan jako prvek se silnou afinitou k dusíku a k uhlíku. Titan se do oceli přidává jako ferotitan nejčastěji v koncentraci 25% až 37% Ti. Titan se používá k dezoxidaci (denitridaci) současně s hliníkem. Ferotitan patří také k feroslitinám s malou měrnou hmotností. Přidává se do pece na dobře dezoxidovanou strusku nebo do pánve do proudu kovu. Při vyšší koncentraci titanu v oceli se ocel hůře odlévá a grafitová zátka se může přilepit k výlevce [2], [21].

4.4 Dezoxidace vápníkem

Rozpustnost vápníku v železe při teplotě 1600 °C je nízká a při tlaku 0,1 MPa se odhaduje na cca 0,02 až 0,03%. Vápník má velkou afinitu ke kyslíku a síře. Vápník se používá v ocelárnách ve formě silikokalcia (nejčastěji 27% až 35 %Ca) a vnáší se různými postupy nejčastěji hluboko pod hladinu kovu (ke dnu

pánve). Dezoxidace vápníkem se provádí v oceli obvykle až po dezoxidaci hliníkem. Vápníku se používá převážně k modifikaci morfologie vměstků [21]. O tom, jaký typ vměstku vznikne po modifikaci oceli vápníkem během tuhnutí, rozhoduje zejména obsah síry, uhlíku a vápníku. Oceli s nízkým obsahem uhlíku tvoří spíše sulfidy II. typu než oceli s vyšším obsahem uhlíku. Oceli s perlitickou strukturou mají sklon tvořit spíše vměstky IV. typu, které u těchto ocelí snižují houževnatost a únavové vlastnosti. Vměstky IV. typu se vyskytují zejména v ocelích s obsahem uhlíku cca 0,50 % vyrobených na kyselých indukčních pecích. Vliv obsahu uhlíku a vápníku na typ vznikajících vměstků po modifikaci oceli vápníkem je graficky znázorněn na *obr. 4.3*. Obrázek byl sestaven na základě metalografické analýzy 120 vzorků oceli na odlitky modifikovaných v pánvi plněným profilem. Jednalo se o tavby z 5 t obloukových pecí a 2 až 4 t taveb z kyselých indukčních pecí. Modifikační přísada na bázi SiCa obsahovala cca 30% vápníku. Typ vměstků ovlivňuje málo pevnostní vlastnosti a tažnost, ale významně houževnatost a zúžení. Uhlík v oceli snižuje koncentraci vápníku v oceli potřebnou k dosažení vměstků I.b typu. Při obsahu uhlíku v oceli cca 0,20 % a obsahu síry 0,015 % odpovídá uvedenému zvýšení houževnatosti obsah vápníku v oceli cca 0,0045%Ca. Podle *obr. 4.3* se v oceli za těchto podmínek již nevyskytují sulfidy II. typu a převládá I.b typ oxisulfidů. Obsah vápníku je udáván v koncentraci stanovenou na spektrálním analyzátoru (kvantometru), tedy jako vápník celkový [2].

Silikokalcium dopravené do lázně uvolňuje bubliny vápníku, které vyplouvají z oceli a reagují s ní. Na hladině páry vápníku reagují s vzdušným kyslíkem. Vápník je podstatně silnější dezoxidační prvek než hliník. V tavenině reaguje s vměstky vzniklými při dezoxidaci hliníkem [2], [18].



Obr. 4.3 Vliv obsahu uhlíku a síry na typ vměstků vznikajících v nelegovaných ocelích [2].

4.5 Dezoxidace lantanidy

Ze skupiny lantanidů se používají v metalurgii oceli k dezoxidaci zejména céř, lantan, které doprovázejí dále praseodym a neodým. Lantanidy jsou dodávány pro slévárny jako ferocéř nebo směsný kov, který obsahuje převážně céř, asi 30% lantanu a zbytek ostatní lantanidy. Všechny lantanidy mají vysokou

afinitu k síře. Po dezoxidaci vznikají jako produkty dezoxidace oxidy, které mohou obsahovat síru. Zbytek lantanidů po reakci s kyslíkem reaguje se sírou. Nevýhodou použití lantanidů je vysoká měrná hmotnost produktů dezoxidace, které pomalu vyplouvají z oceli [2], [18].

5 LASTUROVÝ LOM

Lasturovými lomy se rozumějí lomy probíhající po hranicích primárních austenitických zrn, přičemž primárními zrny jsou v odlitcích austenitická zrna vznikající při tuhnutí a chladnutí odlitku [24]. K dezoxidaci oceli se používají hliníkové housky či odpadní hliník. U ocelí na odlitky se používá vždy závěrečná dezoxidace hliníkem v pánvi [3].

5.1 Teorie vzniku lasturových lomů

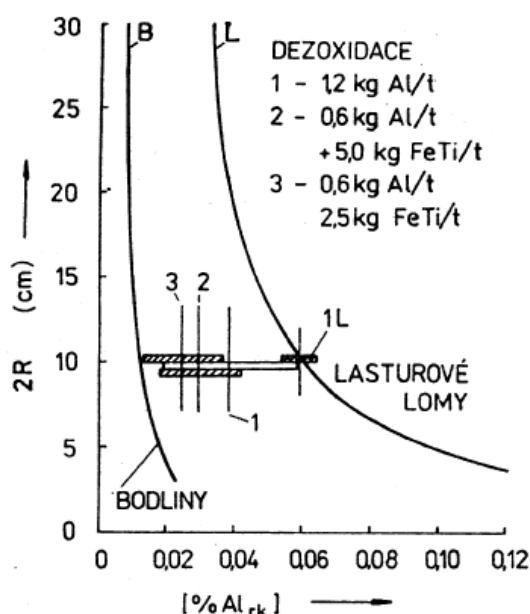
Lze považovat za prokázané, že se na iniciaci lasturových lomů podílí nitrid hliníku a vlastní lomová plocha se vytváří dutinovým mechanismem. Ocel, která rychleji tuhne a chladne, má jemnější primární austenitické zrna a je méně náchylná k tvorbě lasturového lomu [24]. Dále je možno pokládat za prokázané, že lasturové lomy tohoto typu se netvoří v oceli, kde se nenachází volný dusík nebo hliník. Z fyzikálně metalurgických parametrů snižují sklon oceli k lasturovému lomu vyšší rychlost tuhnutí a chladnutí, které v rozhodující míře určují velikost primárního austenitického zrna [22].

Spodní hranice obsahu zbytkového hliníku musí být dostatečná, aby bylo zabráněno uhlíkové reakci po celou dobu odlévání a tuhnutí odlitku. Horní obsah zbytkového hliníku je limitován nebezpečím vzniku lasturových lomů. V ocelích s velmi nízkým obsahem dusíku nebo hliníku se lasturové lomy netvoří. Při výrobě oceli v obloukových pecích jsou výsledné obsahy dusíku v nelegovaných ocelích obvykle 90 – 130 ppm. Při takovém obsahu dusíku je nutné – po dezoxidaci hliníkem – počítat, u odlitků s větší tloušťkou stěn se vznikem nitridu hliníku [2].

Pro výrobu ocelových odlitků jsou doporučené obsahy hliníku závislé na relativní tloušťce stěny odlitku R . Směrodatná tloušťka stěny odlitku – $2R$ [2]. Podrobnější informace k teorii vzniku lasturového lomu lze najít v [2], [24].

5.2 Vznik a výskyt lasturových lomů

Na *obr. 5.1* jsou znázorněny křivky výskytu lasturového lomu a bodlin v závislosti na směrodatné tloušťce odlitku pro oceli s $C=0,28\%$ a $N=0,010\%$



Obr. 5.1 Mezní křivky výskytu lasturového lomu a bodlin [2]

Jak je vidět na *obr. 5.1*, pro tenkostěnné odlitky vychází větší interval rozpuštěného hliníku než u odlitků silnostěnných. Lasturové lomy se vyskytují zejména v silnostěnných odlitcích. Koncentrace hliníku je omezena jak z minimální, tak i maximální hodnoty. Povolené rozmezí koncentrací hliníku se s rostoucí tloušťkou stěny odlitku zužuje [2], [24].

5.3 Shrnutí a opatření proti vzniku lasturových lomů

Lasturový lom lze omezit jednak hlubokým snížením obsahu dusíku nebo použitím legujících prvků, které zjemňují primární austenitické zrna a tvoří s dusíkem nitridy stabilnější než nitrid hliníku. K těmto prvkům patří titan, zirkonium, niob molybden, a také síra. Při kombinované dezoxidaci hliníkem a titanem váže hliník kyslík a titan dusík. Titan působí substituční zpevnění matrice a zvyšuje sklon ke vzniku trhlin. Koncentrace titanu v oceli se doporučuje vyšší než 0,040% [2].

Ve ŽDAS a.s. používají ke kombinované dezoxidaci hliník a zirkonium. Tento prvek má větší silnější dezoxidační a denitridační účinek než titan, váže se jak na dusík, tak na kyslík, takže v kombinaci s hliníkem musí být výsledné rozptyly prvků v provozních tavných větší než při použití titanu. Jak ukázaly výsledky práce [22], společná přísada Al a Zr nezabraňuje vzniku lasturových lomů zcela spolehlivě.

Uspokojivých vlastností u odlitků s lasturovými lomy lze i u masivních odlitků dosáhnout homogenizací s výdrží na teplotách vyšších než 1000°C, jež se předradí vlastnímu tepelnému zpracování odlitků. Podstatné zlepšení materiálových vlastností se dá očekávat i v masivních stěnách odlitků [23].

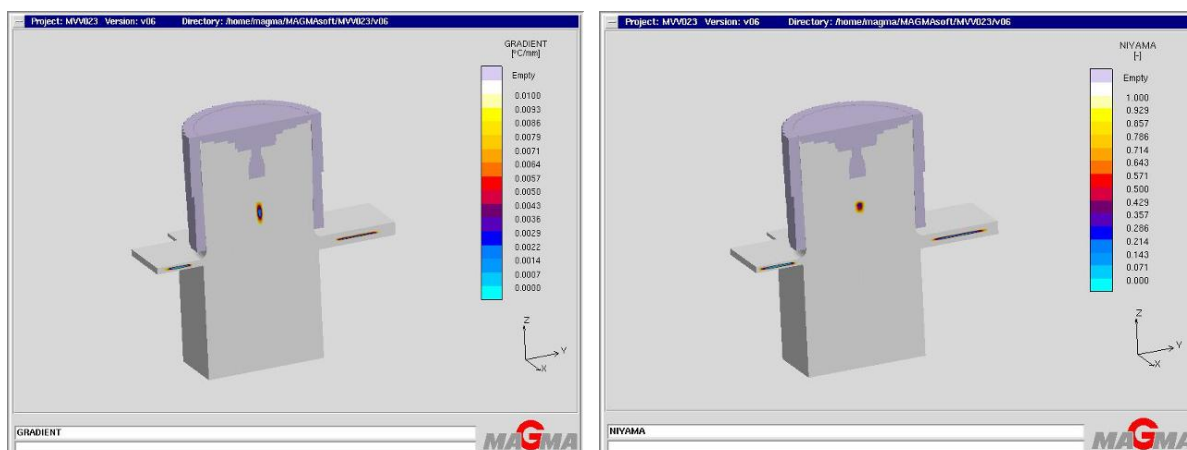
Aplikace homogenizačního žhání nemůže nahradit zásadní metalurgické řešení výroby oceli, které musí spolehlivě zaručit podkritické obsahy hliníku a dusíku, aby lasturové lomy nevznikaly [22]. Pro dosažení nízkých obsahů dusíku je možné zvážit aplikaci pochodu sekundární metalurgie (VD).



Obr. 6.2 Zkušební odlitky – kostky o rozměrech 750 x 750 x 750 mm.

6.2 Popis technologie výroby a simulace plnění, chladnutí a tuhnutí

Jako první krok technologie výroby byla optimalizována pomocí software MAGMASoft technologie lití a nálitkování. Cílem správně zvolené technologie bylo minimalizování rizika vzniku mikroředin. [26]



Obr. 6.3 Ověření navržené technologie sw. MAGMASoft [26].

Tyto odlitky byly odlévány s cílem ověřit, zda při dodržení optimálního obsahu vhodných dezoxidovadel, optimální lící teplotě a optimální technologii nálitkování je možno garantovat výrobu masivních odlitků z uhlíkových ocelí s obsahem C do 0,25 %, bez výskytu lineárních vad pod nálitky při výrobě tekuté oceli pouze na agregátu EOP. Na obr. 6.3 jsou zobrazeny výsledky

simulace navržené technologie a odlitek vlastní kostky. Z výsledků simulace na *obr. 6.3* vyplývá, že staženina by měla vznikat pouze v objemu nálitku. Ke kostce přilítá tzv. „křídla“ sloužila v rámci experimentu k jiným účelům, na které případné vnitřní vady neměly vliv [26].

Jak vyplývá z kapitoly 2.3 je slévárna Žďas vybavena mimo jiné EOP a zařízeními sekundární metalurgie (LF, VD-VOD). Tavení probíhalo na EOP č. 4. Z každé tavby byly odlity vždy dva zkušební odlitky. Celkově tak byly odlity odlitky ze tří taveb. Hmotnost kovu v pánvi byla v rozmezí 11,6 – 12,7 t. Do vsázky bylo použito pouze ocelového odpadu (třísky, pakety, ocelový odpad). Vratný materiál byl použit pouze u jedné z taveb. Množství oxidovaného uhlíku bylo vyšší než 0,3% (v případě jedné tavby dokonce cca 0,9 %).

Jeden odlitek se odléval záměrně z vyšší lící teploty 1610°C, druhý po odstátí pánve z 1570°C. Chemické složení taveb sledovaných odlitků je uvedeno v *tab. 6.1*. Jak je zřejmé z *tab. 6.1*, odlitek č. 1 a 2 byl dezoxidován Al + Zr, odlitek 3 a 4 byl dezoxidován pouze Al a odlitek č. 5 a 6 byl dezoxidován Al + Ti. Dále byly odlity 2 zkušební odlitky zpracované pochodem EOP+VD. Jeden z odlitků byl odlit opět z teploty 1610°C a druhý z teploty 1570 °C. Chemické složení těchto odlitků bylo srovnatelné se složením odlitků 1 – 6, kde obsah Al činil v tavebním vzorku pouze cca 0,015 %. Forma odlitku byla zhotovena z chromitu + furan, lícni část byla zhotovena z křemene + furan [26]. Byl použit náletek o velikosti průměru 700 mm a výšky 700mm.

Jak bylo výše uvedeno, dezoxidace byla prováděna třemi způsoby:

1. Dezoxidace pouze Al, tak aby obsah Al byl v rozmezí 0,015 - 0,025%
2. Dezoxidace Al + Ti, % Al (0,015 - 0,025%), % Ti (0,015 - 0,025%)
3. Dezoxidace Al + Zr, % Al (0,015 - 0,025%), % Zr (0,010 - 0,030%)

Tab. 6.1 Chemické složení taveb odlitků kostek o hraně 750mm [hmot. %] [26].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	Mo	P	S	Ca	Ti	Zr
o.č.1,2	0,19	0,42	1,36	0,21	0,12	0,015	0,07	0,007	0,009	0,003		0,027
o.č.3,4	0,2	0,52	1,31	0,13	0,15	0,024	0,06	0,007	0,012	0,003		
o.č.5,6	0,22	0,47	1,34	0,15	0,08	0,016	0,02	0,01	0,007	0,002	0,015	

Cílem experimentu bylo ověřit i vliv dezoxidace na výskyt lasturových lomů v odlitku s různou dobou tuhnutí (žebra, průřez odlitku). Pro výskyt lasturových lomů je důležitá i koncentrace dusíku. Ocel byla ve všech tavebách legována dusíkem, tak, aby se obsah dusíku pohyboval v rozmezí 100 – 120 ppm.

6.3 Způsob značení vzorků

Pro analýzu morfologie a mikroanalýzu vměstků bylo použito značení uvedené v *tab. 6.2*. Z každého odlitku ve tvaru krychle byly z křídel, které mají tloušťku 20, 40, 60 a 80 mm, odebrány vzorky z oblastí znázorněných na *obr.*

6.5. Analýza morfologie byla provedena na vzorcích z křídel o tloušťce 20 mm. Mikroanalýza vměstků byla provedena na vzorcích z tlouštěk 20 a 80 mm.

Tab. 6.2 Značení vzorků pro morfologii a mikroanalýzu vměstků.

Dezoxidace	číslo odlitku	tloušťka křídla [mm]			
		20	40	60	80
Al	1	1	1.4	1.6	1.8
	2	2	2.4	2.6	2.8
Al+Zr	3	3	3.4	3.6	3.8
	4	4	4.4	4.6	4.8
Al+Ti	5	5	5.4	5.6	5.8
	6	6	6.4	6.6	6.8

Pro zjišťování mechanických vlastností v litém stavu byly vzorky z odlitků označeny 1 – 6 pro odlitky tavené na EOP a 7 – 8 pro odlitky zpracované na VD. Vzorky byly odebrány v litém stavu z okraje, $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ poloměru nálitku. Značení je uvedeno v *tab. 6.3*.

Tab. 6.3 Značení vzorků pro zjištění mech. vlastností v litém stavu.

Dezoxidace	číslo odlitku	číslo vzorku – litý stav		
Al	1	1.1	1.2	1.3
Al+Zr	2	2.1	2.2	2.3
Al	3	3.1	3.2	3.3
Al+Zr	4	4.1	4.2	4.3
Al+Ti	5	5.1	5.2	5.3
Al+Ti	6	6.1	6.2	6.3
VD	7	7.1	7.2	7.3
	8	8.1	8.2	8.3

Pro zjišťování mechanických vlastností po TZ byly vzorky také označeny pro odlitky tavené na EOP 1 – 6 a odlitky zpracované na VD 7 – 8. Vzorky byly odebrány po celé výšce odlitku z tepelné osy odlitku, jak je uvedeno na *obr. 6.4*.

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

Obr. 6.4 Rozřezový plán odlitku.

Tab. 6.4 Značení vzorků pro zjištění mech. vlastností po TZ.

Dezoxidace	číslo odlitku	číslo vzorku									
Al	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
Al	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
Al+Zr	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Al+Zr	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
Al+Ti	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
Al+Ti	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10
VD	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10
	8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	8.10

6.4 Místa odběru vzorků

Jak bylo již výše uvedeno, jedná se o odlitek tvaru krychle o délce hrany 750 mm s žebry o tloušťce stěny 20, 40, 60 a 80 mm. Jakost materiálu podle nové technologie byla sledována na výřezech odebraných ze střední části odlitku a nálitku a z oblasti žeber. V rámci etapy byl posouzen vliv nové technologie na mechanické hodnoty materiálu odlitku, sklon materiálu ke vzniku prasklin při upalování nálitku a čistota oceli.

Nálitky byly po odlití upáleny kyslíko – acetylenovým hořákem a následně byl z vnějšího rohu každého "žebra" u všech odlitků vyřezán vzorek o rozměrech cca 80 x 200 mm. Z každého zkušebního odlitku tak byly odebrány 4 vzorky z míst o tloušťkách 20, 40, 60 a 80 mm. Celá horní plocha u všech odlitků byla následně ofrézována, pro lepší hodnocení následných zkoušek (obr. 6.5).



Obr. 6.5 Místo odběru vzorků.

7 METODY HODNOCENÍ ODLITKŮ

Cílem hodnocení zkoumaných odlitků bylo ověřit, zda je možné při tavení na EOP zaručit výrobu masivních odlitků z uhlíkových ocelí s obsahem C do 0,25 % bez výskytu lineárních vad pod nálitky při dodržení optimálního obsahu vhodných dezoxidovadel v závislosti na podmínkách tuhnutí.

Byla provedena tato hodnocení:

- Metalografické hodnocení;
- Mikroanalýza vměstků;
- Zkoumání lomové plochy po tahové zkoušce;
- Délka trhlin;
- Hodnocení mechanických vlastností v litém stavu.

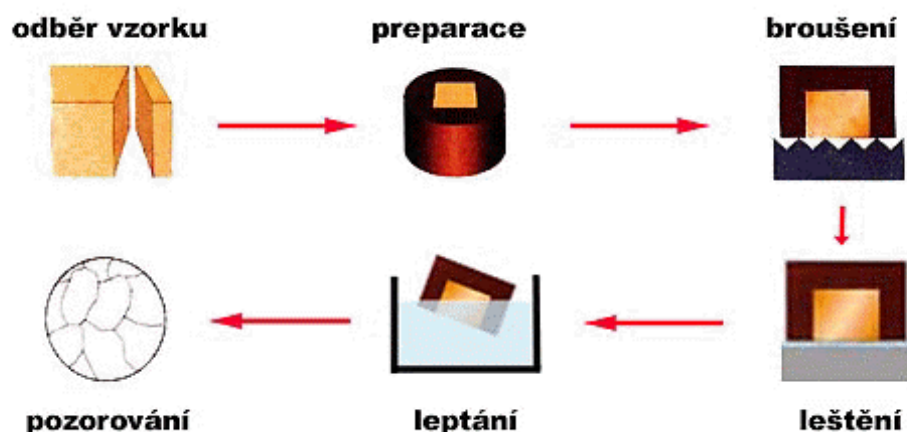
7.1 Metalografické hodnocení

Metalografie je nauka, která pojednává o vnitřní stavbě kovů a slitin. Jejím cílem je zviditelnění struktury materiálu a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu [27]. Cílem hodnocení bylo zjistit morfologii vměstků, jejich velikost a množství.

7.1.1 Příprava vzorků

Vzorky byly odebrány ze zkušebních odlitků z oblasti popsané v kapitole 6.4. Z těchto oblastí byly vyrobeny vzorky na tahovou zkoušku a zkoušku vrubové houževnatosti. K hodnocení metalografie byly použity vzorky

zhotovené z hlav zkušebních tyčí. Hodnocení vzorků proběhlo na optickém mikroskopu. Na obr. 7.1 je schematicky znázorněn postup přípravy metalografických vzorků.



Obr. 7.1 Postup přípravy vzorků pro metalografii. [27]

7.1.2 Metalografické hodnocení vzorků o tloušťce 20 mm

Dezoxidace Al:



Obr. 7.2, vzorek č. 1 – dezoxidace Al, neleptaný (200x).



Obr. 7.3, vzorek č. 2 – dezoxidace Al, neleptaný (200x).

Vzorky 1 a 2 byly dezoxidovány hliníkem. V jejich struktuře byly ve velkém množství kulovité vměstky. Ve vzorku 1 – obr. 7.2 byly vměstky o velikosti 30 μm . Většina vměstků ve struktuře tohoto vzorku měla globulární tvar. Dále byly ve struktuře i samostatně rostoucí vměstky MnS o velikosti 5 μm . Jejich četnost nebyla příliš vysoká. Na obr. 7.3 bylo ve vzorku 2 několik malých kulovitých vměstků typu Al_2O_3 do velikosti 1 – 2 μm . Ve struktuře byly v hojné míře i sulfidy MnS.

Dezoxidace Al + Zr:

Obr. 7.4, vzorek č. 3 – dezoxidace Al+Zr, neleptaný (100x).



Obr. 7.5, vzorek č. 4 - dezoxidace Al+Zr, neleptaný (200x).

Na *obr. 7.4* a *obr. 7.5* jsou vzorky dezoxidované Al + Zr. V jejich struktuře byly neuspořádané vměstky typu ZrFe převážně hranatého tvaru. Tyto vměstky dosahovaly velikosti 5 µm. Pro strukturu vzorku 4 byly typické i kulovité vměstky Al (tmavší místa) s obálkou sulfidu manganu (světlejší místa) – *obr. 7.5*. Tyto vměstky dosahovaly velikosti 3 µm. Výskyt vměstků Al je spíše ojedinělý.

Dezoxidace Al + Ti

Obr. 7.6, vzorek č. 5 – dezoxidace Al+Ti, neleptaný (200x).



Obr. 7.7, vzorek č. 6 – dezoxidace Al+Ti, neleptaný (200x).

U vzorků dezoxidovaných Al + Ti byly ve struktuře větší kulovité vměstky o velikosti až 15 µm – *obr. 7.7*. Převážná většina vměstků ve struktuře těchto vzorků měla globulární tvar. Ve struktuře vzorku 6 – *obr. 7.6* byly kulovité vměstky do velikosti 5 µm. Dále se ve vzorku 6 vyskytují i drobné vměstky MnS v řádcích. Tyto vměstky měly velikost 1 – 2 µm.

7.1.3 Vyhodnocení metalografického hodnocení vzorků:

Metalografií byly hodnoceny vzorky z tloušťky stěny 20 mm. Z výsledků vyplynulo několik závěrů:

- Ve vzorcích dezoxidovaných hliníkem byly ve velké míře kulovité vměstky, které měly pravidelný tvar a velikost cca 10 μm .
- V hojně míře byly v těchto vzorcích i sulfidy MnS.
- Ve vzorcích, kde byl jako dezoxidační přísada použit hliník a zirkon, byly ve struktuře hranaté vměstky.
- Tyto vměstky měly ve struktuře také kulovité vměstky Al o velikosti 3 μm .
- Vzorky dezoxidované hliníkem a titanem měly ve struktuře většinu vměstků kulovitěho tvaru s velikostí až 15 μm .
- Ve vzorcích o tloušťce 20 mm nebyly nalezeny karbidy, jejich výskyt se předpokládá ve větších tloušťkách, což se potvrdilo při mikroanalýze.

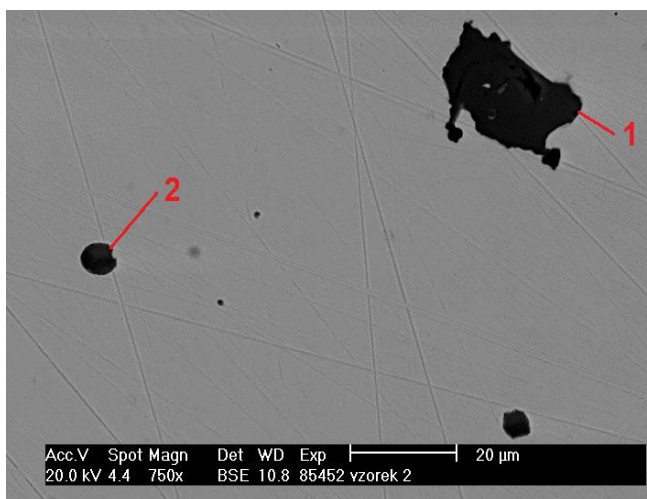
7.2 Mikroanalýza vměstků

Mikroanalýza vměstků byla provedena na elektronovém rastrovacím mikroskopu Philips XL 30 – EDAX (REM). Vzorky byly při analýze rozděleny do tří skupin podle druhu použité dezoxidace. První skupinu tvořily vzorky z odlitků dezoxidovaných Al, druhou odlitky dezoxidované Al + Zr a třetí skupinu odlitky dezoxidované Al + Ti. V každé skupině byly hodnoceny vzorky z odlitku s tloušťkou 20 a 80 mm. Cílem analýzy bylo stanovit vliv použité dezoxidace na morfologii a chemické složení vměstků. Dále určit zda má rozdílná tloušťka odlitku (doba tuhnutí) vliv na morfologii a chemické složení vměstků.

7.2.1 Analýza vzorků dezoxidovaných Al

V první části byly analyzovány vzorky z odlitku dezoxidovaných hliníkem z tloušťky stěny odlitku 20 mm.

Ve vzorku 2 (vzorek z křídla o tloušťce 20 mm, dezoxidován Al) byly identifikovány 2 typy vměstků. Jednalo se o oxidické vměstky na bázi oxidů Al_2O_3 a dále sulfidy na bázi MnS. Oxidické vměstky byly převážně zakulaceného tvaru nebo ostrohranného tvaru (vměstky III. typu). Sulfidy se ve vzorku objevovaly jako samostatné zakulacené vměstky nebo vměstky rostoucí na oxidech. Velikost vměstků byla ve většině případů do cca 5 μm . V některých místech se nacházely i vměstky větších rozměrů, které mají pravděpodobný původ v reoxidačních pochodech. Na *obr. 7.8* jsou zachyceny vměstky ve vzorku 2. Výsledky mikroanalýzy vměstků jsou uvedeny v *tab. 7.1*.



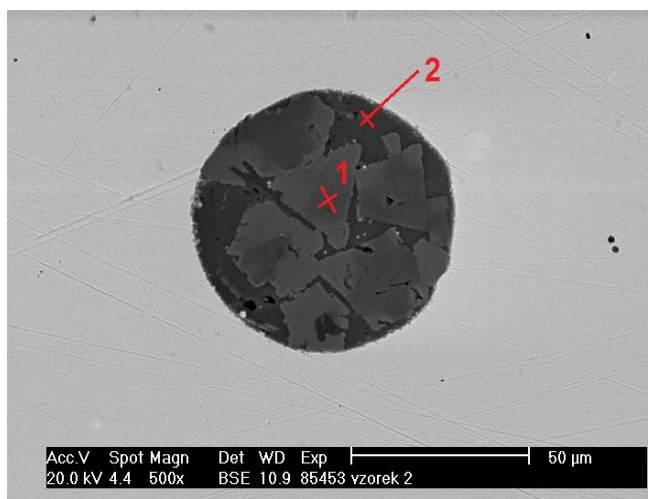
Obr. 7.8 Vzorek 2 – dezoxidace Al, snímek 85452.

Na *obr. 7.8* je zachycen v místě 1 vměstek na bázi Al_2O_3 o velikosti $20 \times 10 \mu\text{m}$ obsahující i malou koncentraci Mg a Ca. Jedná se o vměstky III. typu, jejichž výskyt ve vzorku byl méně častý. Menší kulovité vměstky (místo 2) se vyskytují v celém analyzovaném vzorku. Jak vyplývá z výsledků mikroanalýzy v místě 2, jedná se o oxidy Al_2O_3 modifikované Ca. Přítomnost vápníku vysvětluje zakulacený tvar těchto vměstků (typ I. b).

Tab. 7.1 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 2 [at. %], snímek 85452.

Popis analýzy			Prvek					
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Si	Zr	Ca
85452	1		51,12	43,08	1,11	0,95		3,74
85452	2		51,5	28,31	3,29	4,63	2,16	11,72

Ve vzorku 2 se místně nacházely vměstky o velikosti $20 - 40 \mu\text{m}$. Snímek takového vmětku je uveden na *obr. 7.9*. Jak vyplývá z výsledků mikroanalýzy vmětku (*tab. 7.2*), je tvořen dvěma fázemi. Jedná se o oxidy proměnlivého složení obsahujícími i vyjma Al a Ca tak Si a Mn. Jedná se o vměstek jehož tvar i složení je typické pro místa v odlitku, kde proběhla reoxidace oceli. Jedná se tak o nestandardní vměstek v odlitku dezoxidovaným Al a Ca.

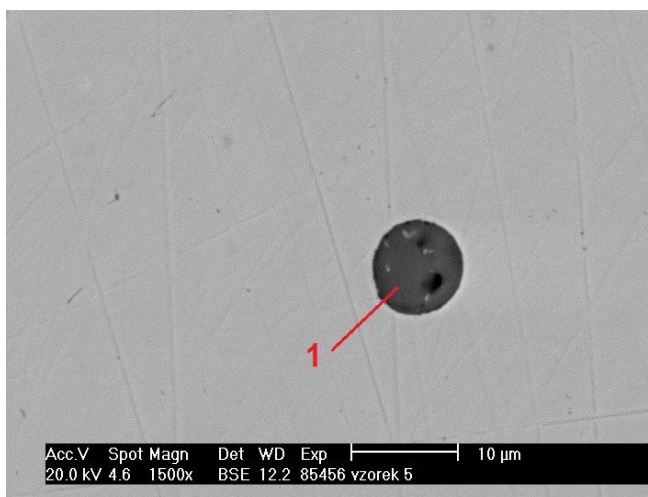


Obr. 7.9 Vzorek 2 – dezoxidace Al, snímek 85453.

Tab. 7.2 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 2 [at. %], snímek 85453.

Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Ca
85453	1		50,88	38,14	1,9	8,78	0,29			
85453	2		53,85	17,94		0,7		19,26	0,57	7,67

Analýza vměstků byla provedena i na vzorku č. 5, který má totéž složení (stejná tavba) a liší se pouze lící teplotou (1570°C). Na výbruse vzorku 5 se vyskytují opět kulovité vměstky oxidu hliníku o velikosti do cca 5 μm. Sulfidy jsou na bázi MnS a jsou opět vyloučeny jako samostatné vměstky nebo rostoucí na oxidických vměstcích. Z hlediska chemického složení morfologie vměstků jsou oba vzorky (2 a 5) identické. Rozdíl je pouze v množství vměstků, kdy ve vzorku 5 je množství vměstků významně nižší. Typický vměstek pro vzorek 5 je uveden na obr. 7.10. Jak vyplývá z výsledků mikroanalýzy chemického složení (tab. 7.3) jedná se opět o oxidy na bázi Al_2O_3 obsahující vysoký obsah Ca a dále nižší koncentraci Mg a Si.

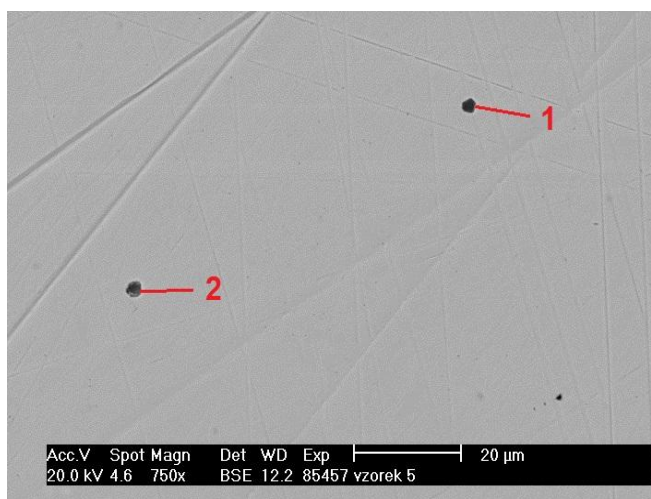


Obr. 7.10 Vzorek 5 – dezoxidace Al, snímek 85456.

Tab. 7.3 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 5 [at. %], snímek 85456.

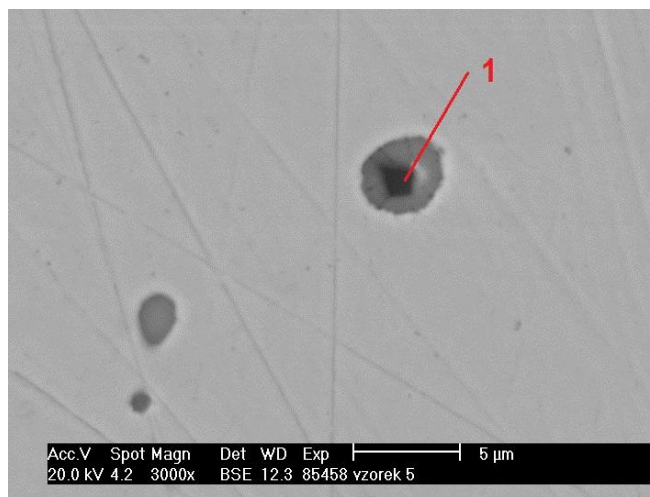
Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Mg	Al	Si	Zr	Ca	Fe
85456	1		45,78	3,98	27,8	3,87	0,35	16,84	1,3

Na obr. 7.11 jsou zachyceny pro vzorek 5 typické kulovité vměstky hliníku s obálkou sulfidu manganu. Chemické složení vměstků je uvedeno v tab. 7.4. Vměstek – místo 1 odpovídá typickému vměstku ve vzorku 2 a 5, tj. oxidům na bázi Al_2O_3 s proměnlivou koncentrací Ca a Si. Místo dva představuje sulfidickou obálku na bázi MnS na oxidickém vměstku.

**Obr. 7.11 Vzorek 5 – dezoxidace Al, snímek 85457.****Tab. 7.4 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 5 [at. %], snímek 85457.**

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Mg	Al	Mn	S	Ca	Fe
85457	1		43,87	6,49	31,11	1,56	2,16	3,02	11,01
85457	2		32,93	2,93	17	10,04	11,54	5,2	17,49

Typické sulfidické vměstky pro vzorek 5 při zvětšení 3000x jsou zachyceny na *obr. 7.12*. Jedná se o vměstky na bázi MnS rostoucí samostatně nebo na oxidickém vměstku (místo 1). Výsledky mikroanalýzy jsou uvedeny v *tab. 7.5*.



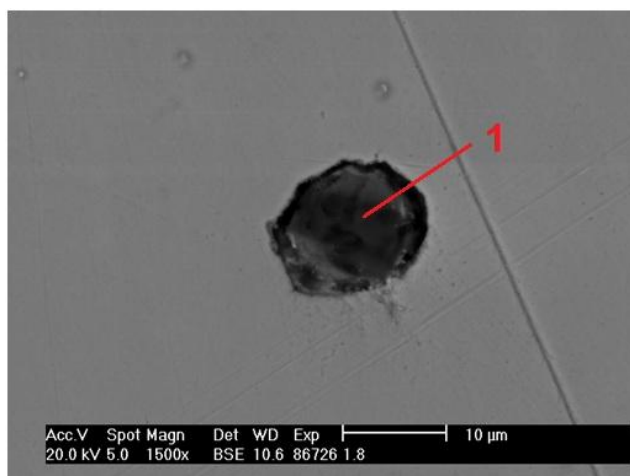
Obr. 7.12 Vzorek 5 – dezoxidace Al, snímek 85458.

Tab. 7.5 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 5 [at. %], snímek 85458.

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Mg	Al	Mn	S	Ca	Fe
85458	1		31,04	4,11	24,74	12,93	17,14	2,92	4,98

V druhé části byly analyzovány vzorky z odlitku dezoxidovaných hliníkem z tloušťky stěny odlitku 80 mm (vzorek 1.8 a 2.8). Oba vzorky jsou ze stejných odlitků jako vzorky 2 a 5.

Ve vzorku 1.8 byly identifikovány opět 2 typy vměstků. Jednalo se o oxidické vměstky na bázi oxidů Al_2O_3 a dále sulfidy na bázi MnS. Oxidické vměstky byly zakulaceného tvaru. Sulfidy se ve vzorku objevovaly jako samostatné zakulacené vměstky nebo vměstky rostoucí na oxidech. Velikost vměstků byla ve většině případů cca 5 – 10 μm . Na *obr. 7.13* jsou zachyceny vměstky ve vzorku 1.8. Výsledky mikroanalýzy vměstků jsou uvedeny v *tab. 7.6*.



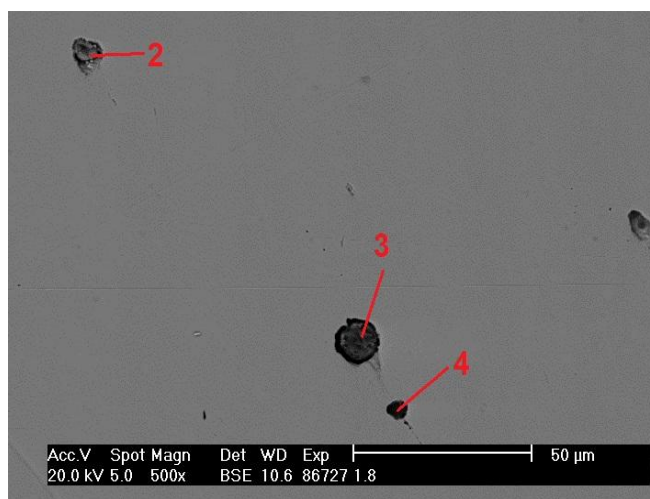
Obr. 7.13 Vzorek 1.8 – dezoxidace Al, snímek 86726.

Jak vyplývá z výsledku mikroanalýzy v místě 1 vzorku 1.8, jedná se o kulovitý vměstek typu Al_xO_y , obsahující dále 6,74 at. % Mg. Velikost vměstku je cca 15 μm .

Tab. 7.6 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 1.8 [at. %], snímek 87726.

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Mn	Fe		
86726	1		47,72	43,03	6,74	1,11	1,40		

Typické kulovité vměstky pro vzorek 1.8 na bázi Al_2O_3 jsou uvedeny na obr. 7.14 (místo 3 a 4). V místě 2 je zachycen sulfid MnS o velikosti cca 10 μm . Výsledky mikroanalýzy vměstků ze snímku 86727 jsou uvedeny v tab. 7.7. Na výbrusu se vyskytovaly sulfidy jako samostatné vměstky nebo rostoucí na oxidech. Ve vzorku byly nalezeny i vměstky II. typu. Množství vměstků bylo vyšší než ve vzorcích ze stejného odlitku s menší tloušťkou stěny.



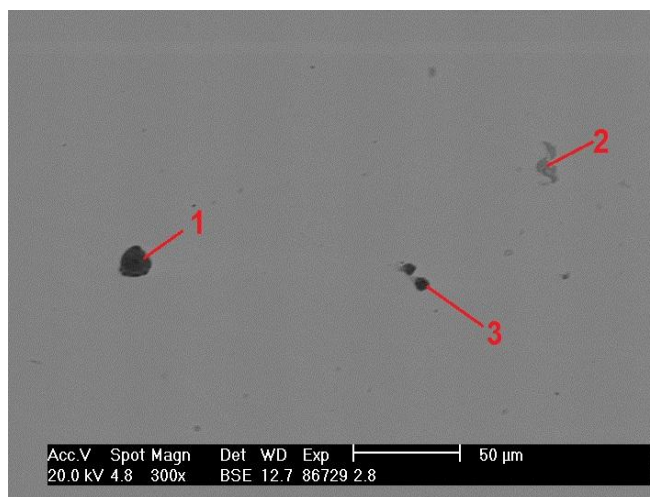
Obr. 7.14 Vzorek 1.8 – dezoxidace Al, snímek 86727.

Tab. 7.7 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 1.8 [at. %], snímek 86727.

Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Poz.	O	Al	Mg	Mn	Fe	S	Ca	Si
86727	2		15,54	4,87	0,83	31,64	8,85	35,72	2,56	
86727	3		53,44	24,29	1,88	0,46	0,71		11,44	7,31
86727	4		57,9	26,94	0,82	0,82	0,85	0,46	7,06	2,04

Jak je uvedeno výše, vzorek 2.8 je ze stejného odlitku jako vzorky 2 a 5. Ve vzorku 2.8 byly identifikovány oxidické vměstky na bázi oxidů Al_2O_3 a dále sulfidy na bázi MnS . Oxidické vměstky byly také zakulaceného tvaru. Sulfidy se ve vzorku objevovaly jako samostatné zakulacené vměstky nebo vměstky rostoucí na oxidech. Velikost vměstků byla ve většině případů cca 5 – 10 μm .

Na obr. 7.15 jsou zachyceny vměstky ve vzorku 2.8. Výsledky mikroanalýzy vměstků jsou uvedeny v tab. 7.8.



Obr. 7.15 Vzorek 2.8 – dezoxidace Al, snímek 86729.

Místo jedna odpovídá oxidu Al_2O_3 s příměsí Mg. Také Mg má schopnost modifikace vměstku, a vysvětluje zakulacený tvar vměstku. Místo 2 odpovídá vměstku MnS obsahujícím navíc příměs Ca. Fe ve vzorku je pravděpodobně z okolní matrice.

Tab. 7.8 Chemické složení analyzovaných fází vzorku 2.8 [at. %], snímek 86729.

Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Mn	Fe	S	Ca	Si
86729	1		53,47	34	11,1	1,43				
86729	2					36,99	19,06	41,72	2,23	
86729	3		58,5	34,06	5,04	0,93			0,82	0,65

Z hlediska chemického složení i morfologie oxidických i sulfidických vměstků jsou oba vzorky odlitků dezoxidovaných hliníkem z tloušťky stěny 80 mm rovnocenné.

7.2.2 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al

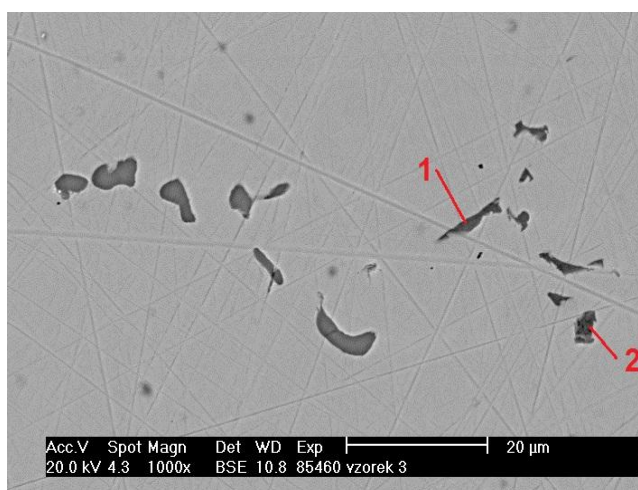
Při mikroanalýze vměstků byly hodnoceny vzorky ze dvou odlitků. V každém odlitku byly hodnoceny vzorky z tloušťky stěny 20 a 80 mm. Z výsledků vyplynulo několik dílčích závěrů:

- Ve všech vzorcích byl kyslík vázán na hliník a obsahoval dále proměnlivý obsah Mg, Ca a Si.
- Ve všech vzorcích byly oxidické vměstky převážně ve tvaru kulovitých vměstků s velikostí do 5 μm . Ve vzorcích z tloušťky stěny 80 mm byly oxidické mírně větší a měli v některých případech velikost i 10 až 15 μm .
- Kulovitý tvar oxidických vměstků souvisel s modifikací vměstků Ca, příp. Mg.

- V jednom ze vzorků s tloušťkou stěny byly sledovány i vměstky větší velikosti, vzniklé patrně v důsledku reoxidace taveniny.
- Síra byla ve všech vměstcích vázána na MnS a obsahovala i příměsi Ca, Mg a Fe.
- Vměstky – sulfidy byly vyloučeny ve všech vzorcích jako zakulacené vměstky rostoucí samostatně nebo na oxidických vměstcích.
- Jiné typy vměstků jako nitridy, karbidy apod. nebyly ve vzorcích pozorovány.
- Morfologie i chemické složení většiny vměstků bylo rovnocenné u všech čtyř odlitků a nebylo ovlivněno tloušťkou stěny. Subjektivně byl pozorován větší výskyt vměstků u jednoho z hodnocených odlitků a lze očekávat větší výskyt vměstků v odlitcích s menší tloušťkou stěny odlitku.

7.2.3 Analýza vzorků dezoxidovaných Al + Zr

Ve druhé části mikroanalýzy vměstků byly analyzovány vzorky z odlitku dezoxidovaných hliníkem a zirkonem z křídla tloušťky stěny 20 mm.

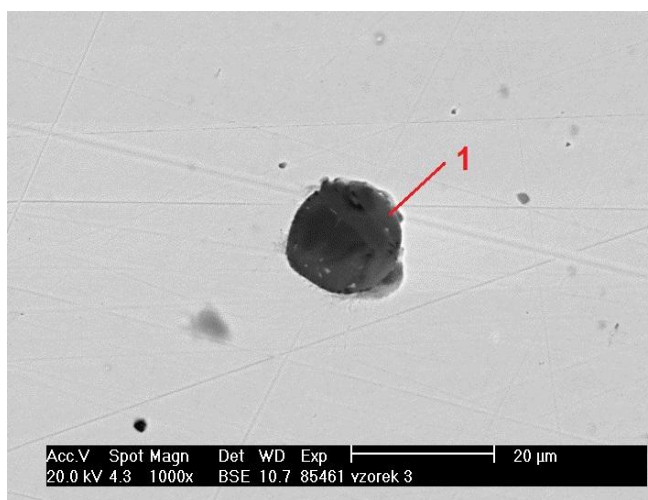


Obr. 7.16 vzorek 3 – dezoxidace Al + Zr, snímek 85460.

Na obr. 7.16 je uveden vzorek 3, který byl dezoxidován hliníkem a zirkonem. Byly v něm identifikovány oxidy a protažené sulfidy do velikosti 10 μm. Vměstky na bázi Ti (místo 1, tab. 7.9) měly protáhlý ostrý tvar, cca 10 μm. Ti byl vázán patrně na C. V místě fáze 2 se vyskytovaly hranaté nitridy titanu popř. karbonitridy. Chemické složení je uvedeno v tab. 7.9. Dále na výbruse byly i samostatně rostoucí vměstky MnS.

Tab. 7.9 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85460

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	C	S	Ti	Mn	Fe	N	
85460	1		58,28	5,2	12,21	5,29	19,03		
85460	2				73,52		14,92	11,56	

**Obr. 7.17 vzorek 3 – dezoxidace Al + Zr, snímek 85461**

Ve struktuře vzorku 3 se dále nacházely kulaté vměstky na bázi Al (obr. 7.17). Byly osamělé do velikosti max. 5 µm i mírně větší, např. 10 µm. Byly rovnoměrně rozptýlené, měly zakulacený tvar. Chemické složení vměstku je uvedeno v tab. 7.10.

Tab. 7.10 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85461

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Mn	Fe	Ca	
85461	1		47,54	35,85	14,5	0,82	0,54	0,74	

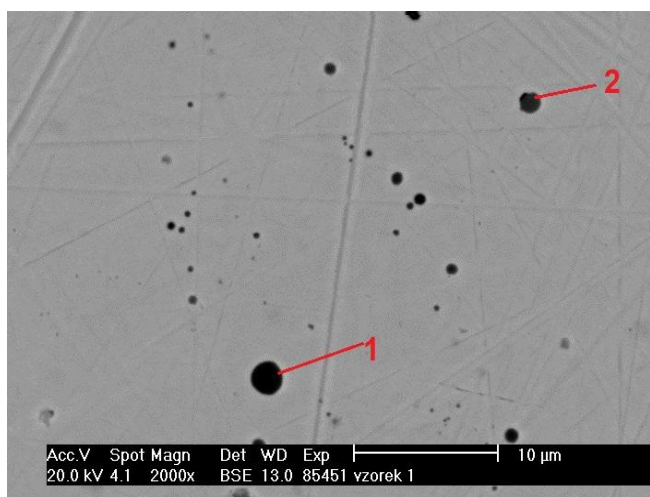


Obr. 7.18 vzorek 6 – dezoxidace Al + Zr, snímek 85459

Na snímku *obr. 7.18* byl uveden často se ve vzorku 6 vyskytující vměstek. Vzorek 6 je ze stejného odlitku, jako vzorek 3 a oba dva jsou z tloušťky stěny křídla 20 mm. Na základě rovnovážného diagramu Fe-Zr šlo odhadnout, že složení vměstku odpovídalo sloučenině $ZrFe_3$. Jádrem vměstku tvořil oxid zirkonia se sulfidy manganu. V místě 1 se vyskytoval samotný Zr, chemické složení uvedených fází je v *tab. 7.11*. Na výbruse byly nalezeny četné sulfidy manganu. Ve vzorku 6 se také vyskytovalo velké množství nitridů a MnS.

Tab. 7.11 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85459

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	Zr	Ti	Fe	Ca	O	S	Mn
85459	1		89,9	3,39	6,71				
85459	2		16,5		22,4	7,52	16,25	20,99	16,34



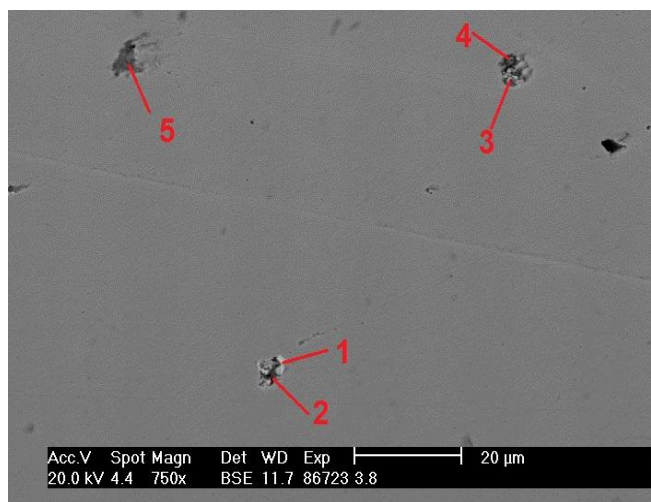
Obr. 7.19 vzorek 1 – dezoxidace Al + Zr, snímek 85451

Na výbruse vzorku 1 - *obr. 7.19* převládaly vměstky typu MnS. Sulfidy byly místy vyloučeny i v řetězcích. Četné byly také vměstky obsahující Zr a Fe. Kyslík byl vyloučen jako oxidy hliníku obsahující dále zirkonium a vápník. Většina vměstků měla rozměr 1 až 2 μm . Na vzorku se vyskytovaly malé kulovité vměstky velikosti 1 – 2 μm typu AlO. Oxidy obsahovaly Al a Zr. Chemické složení vměstků v místě 1 (2,2 μm) a v místě 2 (1,3 μm) je uvedeno v *tab. 7.12*. Sulfidy MnS, které se vyskytovaly v řádcích, obsahovaly 42 at. %S, 43 at. %Mn.

Tab. 7.12 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85451

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Zr	Mn	Fe		
85451	1		39,23	40,35	0,81	0,87	18,74		
85451	2		32,1	31,12	3,97	0,7	32,11		

Stejně jako u dezoxidace Al byly i u dezoxidace Al + Zr analyzovány vzorky z křídel o tloušťce stěny 80 mm.

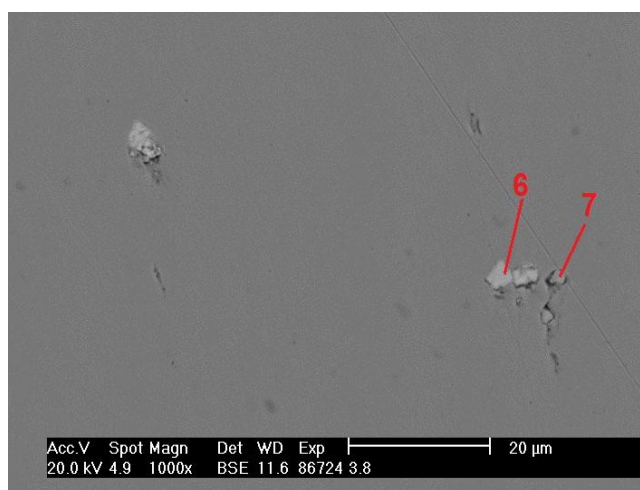


Obr. 7.20 vzorek 3.8 – dezoxidace Al + Zr, snímek 86723

Ve vzorku 3.8 – *obr. 7.20* se v místě 1 vyskytovala fáze s 49,8 at. %Zr – světlé místo. V místě 3 a 4 se vyskytovaly typické vměstky pro sledovaný vzorek. Četnost výskytu těchto vměstků byla častá. Velmi často bylo ve vzorku 3.8 i samostatné Zr. Chemické složení analyzovaných fází je uvedeno v *tab. 7.13*. V místě 1 a 2 se vyskytovaly sirníky oblého tvaru s nejvíce at. %Zr.

Tab. 7.13 chem. složení analyzovaných fází v at. %, snímek 86723

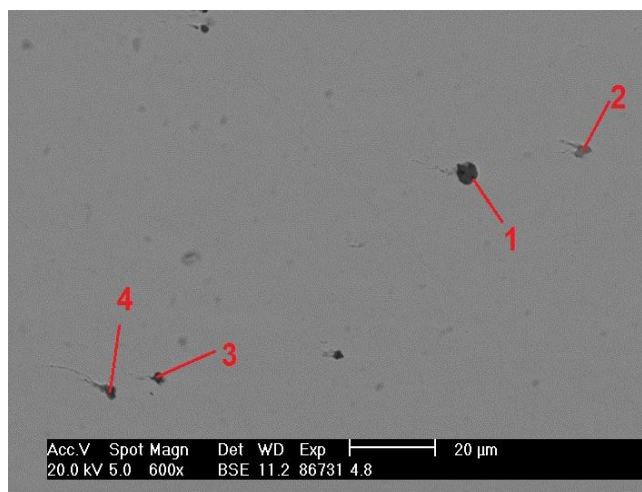
Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Pozn.	O	Ti	Mg	Mn	Fe	S	Ca	Zr
86723	1			1,85			48,34			49,8
86723	2		22,91		2,22	18,21	18,01	26,6	8,3	3,68
86723	3		46,57		2,03	7,91	9,33	14,9	5,8	13,4
86723	4		23,58		2,54	13,59	33,22	20,2	2,08	1,76
86723	5				1,8	40,41	5,87	46,5	2,12	3,2

**Obr. 7.21 vzorek 3.8 – dezoxidace Al + Zr, snímek 86724**

Na výbrusu vzorku 3.8, který je na *obr. 7.2, 1* se v místě 6 se vyskytoval hranatý, samostatně rostoucí Zr o velikosti cca 6 µm. Takových fází bylo ve vzorku identifikováno ve více místech. V místě 7 se vyskytovala fáze Zr s 2,81 at. %Ca. Sírniky Zr a Ca se obvykle vyskytovaly s Ti. Chemické složení sledovaných fází je v *tab. 7.14*.

Tab. 7.14 chem. složení analyzovaných fází v at. %, snímek 86724

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	O	Mg	Zr	Ca	Mn	Fe	Ti
86724	6				87,41			9,16	3,43
86724	7		57,63	2,6	30,53	2,81	1,27	5,17	



Obr. 7.22 vzorek 4.8 – dezoxidace Al + Zr, snímek 86731

Jak je uvedeno na *obr. 7.22* ve vzorku 4.8 byl v místě 1 kulovitý vměstek Al_2O_3 o velikosti cca 5 μm s Ca o 6,34 at. %. V místě 2 se vyskytovaly sirníky MnS. V místech 3 a 4 byly analyzovány opět kulovité vměstky s Ca a Mg o velikosti cca 2 – 3 μm . Chemické složení analyzovaných fází je uvedeno v *tab. 7.15*.

Tab. 7.15 chem. složení analyzovaných fází v at. %, snímek 86731

Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Pozn.	O	Al	Mg	Mn	Fe	S	Ca	Si
86731	1		53,19	31,9	1,49	0,81	1,32	1,75	6,34	2,38
86731	2					49,49	4,67	45,8		
86731	3		45,38	27,8	1,47	6,52	5,5	7,5	4,52	
86731	4		42,64	25,0	3,33	8,21	5,04	10,3	4,62	

7.2.4 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al + Zr

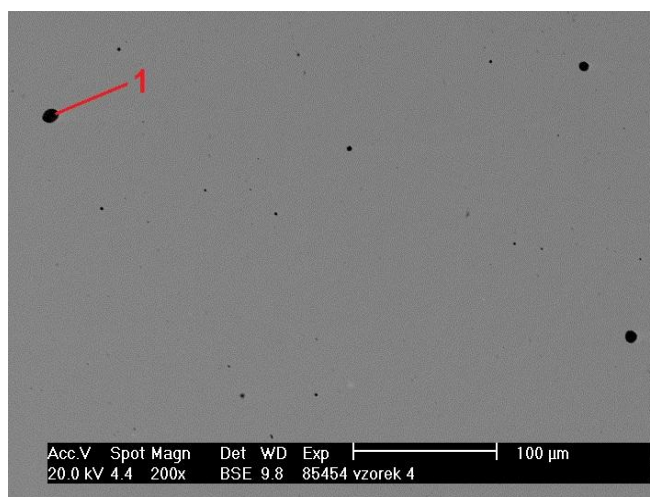
Z výsledků mikroanalýzy vzorků po dezoxidaci Al + Zr vyplynulo několik dílčích závěrů:

- Ve většině vzorcích se vyskytuje samostatně rostoucí sirníky Zr a MnS.
- Kyslík byl ve všech vzorcích vyloučen jako oxid hliníku s proměnlivými obsahy Zr a Ca.
- V jednom ze vzorků se vyskytují vměstky na bázi titanu, které mají protáhlý tvar, velikost 10 μm a jsou patrně vázány na C. V tomto vzorku se také vyskytují hranaté nitridy titanu.

- Síra byla ve všech vměstcích vázána na MnS.
- Vměstky mají ostrohranný tvar, pouze vměstky Al mají tvar zakulacený.
- Samostatně rostoucí sirníky Zr se obvykle vyskytují s titanem.

7.2.5 Analýza vzorků dezoxidovaných Al + Ti

Ve třetí části hodnocení mikroanalýzy vměstků byly analyzovány vzorky z odlitku dezoxidovaných hliníkem a titanem z tloušťky stěny odlitku 20 mm.

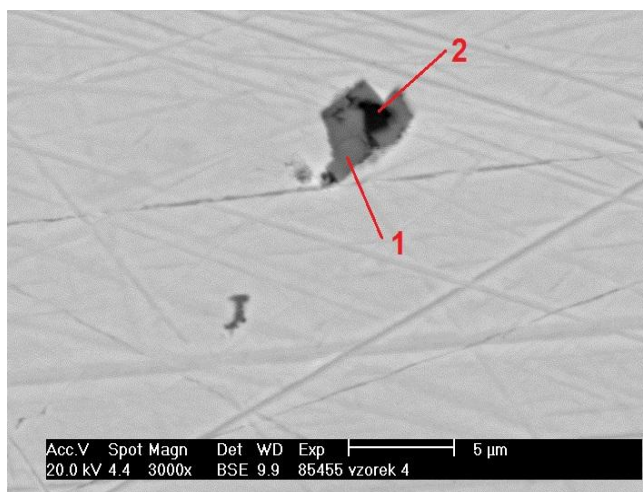


Obr. 7.23 vzorek 4 – dezoxidace Al + Ti, snímek 85454

Jak můžeme vidět na obr. 7.23, ve vzorku 4 dezoxidovaném Al a Ti z tloušťky stěny odlitku 20 mm byly ve struktuře kulovité oxidy Al s příměsí Ca do velikosti 5 μm . Dále byly na výbrusu analyzovány drobné sirníky MnS, které se vyskytovaly jak samostatně, tak v řádcích. Dosahovaly velikosti cca 10 μm . Dále ve vzorku byly identifikovány drobné vměstky s Ti – karbonitridy. Chemické složení místa 1 najdeme v tab. 7.16.

Tab. 7.16 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85454

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	poznámka	O	Al	Ca	Ti			
85454	1		51,81	44,07	3,78	0,34			



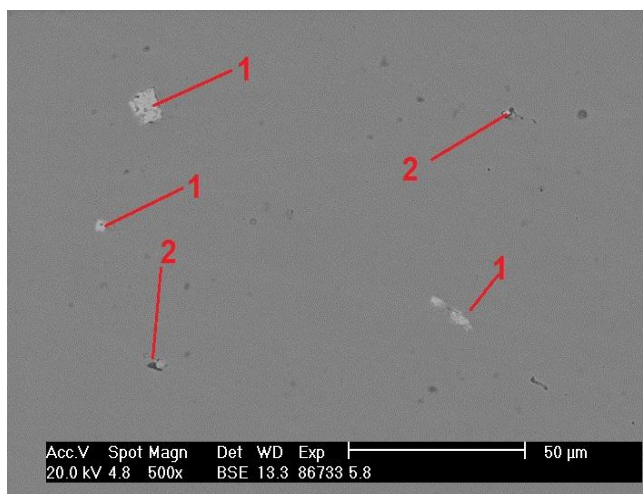
Obr. 7.24 vzorek 4 – dezoxidace Al + Ti, snímek 85455

Na *obr. 7.24* je uveden komplexní vměstek ze vzorku č. 4. Tmavé jádro vměstku obsahovalo oxid Al s příměsí Ca. Světlý hranatý vměstek obsahoval nitrid titanu. Složení vměstku najdeme v *tab. 7.17*.

Tab. 7.17 chem. složení analyzovaných fází v místě 1 v at. %, snímek 85455

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	Pozn.	N	Al	Ti	Fe	O	Mg	Ca
85455	1		17,13	1,76	74,6	6,51			
85455	2			32,83	11,8		48,3	1,4	2,77

Stejně jako v předchozích případech byly také u dezoxidace Al + Ti analyzovány vzorky z tloušťky stěny odlitku 80 mm.

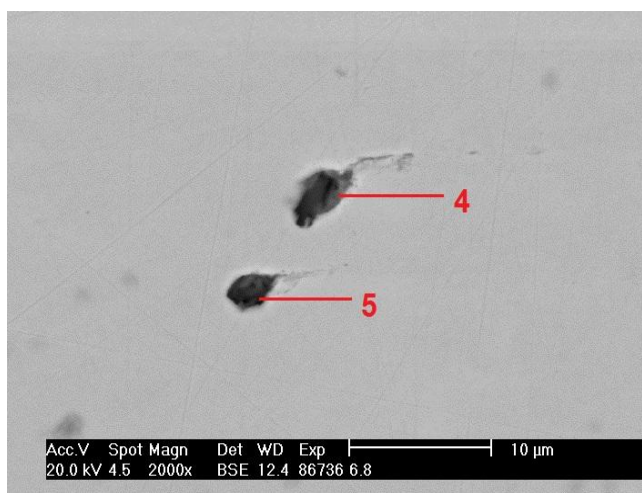


Obr. 7.25 vzorek 5.8 – dezoxidace Al + Ti, snímek 86733

Ve vzorku 5.8 – obr. 7.25 byl objeven vznik samostatné fáze ZrMn hranatého tvaru v hojně míře, méně Zr a sulfidy. V místě 1 se vyskytovalo samostatné Zr o velikosti do 10 μm . V místě 2 byly tmavá místa, sulfidy s 1,97 at. % Zr. Sulfidy se ve vzorku objevovaly ve větší míře i v řádku. Chemické složení uvedených fází je v tab. 7.18.

Tab. 7.18 chem. složení analyzovaných fází v at. %, snímek 86733

Popis analýzy		Prvek							
č. snímku	místo	Zr	Mg		Ca	Mn	Fe	Ti	S
86733	1	90,69					6,22	3,09	
86733	2	1,97	2,03		3,17	37,38	16,5		38,95



Obr. 7.26 vzorek 6.8 – dezoxidace Al + Ti, snímek 86736

Vzorek 6.8 – obr. 7.26 byl dezoxidován Al+Ti a byl odebrán z křídla o tloušťce 80 mm. Ve vzorku č. 6.8 se vyskytuje velké množství vměstků AlTi. Dosahují velikosti až cca 3 μm . Vměstky mají kulovitý až hranatý tvar. Výskyt sirníků je velmi omezen, jsou zřejmě vázané v komplexních vměstcích – místo 4 a 5. Jejich chemické složení je uvedeno v tab. 7.20. Ojediněle se vyskytuje sirník s % Ti.

Tab. 7.20 chem. složení analyzovaných fází v at. %, snímek 86736

Popis analýzy		Prvek								
č. snímku	místo	O	Mg	Al	Ca	Mn	Fe	Ti	S	Si
86736	4	45,78	1,62	24,38	4,14	5,69	8,55	0,79	8,75	0,32
86736	5	52,18	1,08	23,1	6,38	4,09	4,11	1,21	6,94	0,9

7.2.6 Vyhodnocení mikroanalýzy vměstků odlitků dezoxidovaných Al + Ti

Také z výsledků mikroanalýzy vzorků po dezoxidaci Al + Ti vyplynulo několik dílčích závěrů:

- Pouze vzorek 4 (tl. stěn 20mm, dezoxidace Al+Ti) obsahuje kulovité vměstky Al s příměsí Ca, mají velikost do 5 μm .
- Ve stejném vzorku se vyskytují sulfidy MnS, samostatně i v řádcích.
- Pouze ve vzorku 4 se vyskytují karbositridy – drobné vměstky s Ti.
- Ve vzorku č. 5.8 se objevuje v hojné míře fáze ZrMn hranatého tvaru.
- Vměstky AlTi se vyskytují pouze ve vzorku č. 6.8, dosahují velikosti až 3 μm .

7.3 Hodnocení lomové plochy po tahové zkoušce [28]

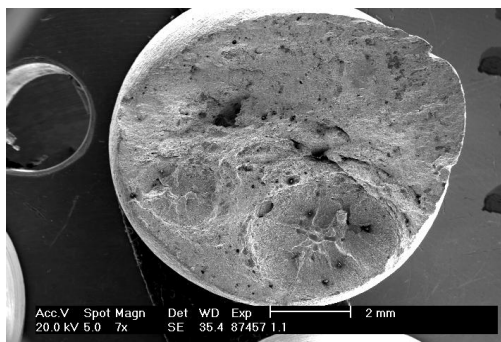
Jak již bylo uvedeno dříve, celkem bylo odlito 6 odlitků. Odlitky č. 1 a 2 byly dezoxidovány pouze Al, odlitky 3 a 4 byly dezoxidovány Al a Zr a odlitky 5 a 6 byly dezoxidovány Al a Ti. Série odlitků byla vyrobena za účelem vyhodnocení dezoxidace oceli nízkými obsahy hliníku 0,020 až 0,030 % Al u odlitků s různou tloušťkou stěn. Cílem bylo sledovat na lomových plochách mechanismus porušení. Dále byly sledovány na lomových plochách defekty jako řediny a vměstky defektní velikosti. Lomové plochy byly prohlédnuty také s ohledem na možný výskyt lasturového lomu. Na hodnocení byly použity vzorky, které byly odebrány po celé výšce odlitku v tepelné ose, jak je uvedeno v kapitole 6.2.

7.3.1 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al

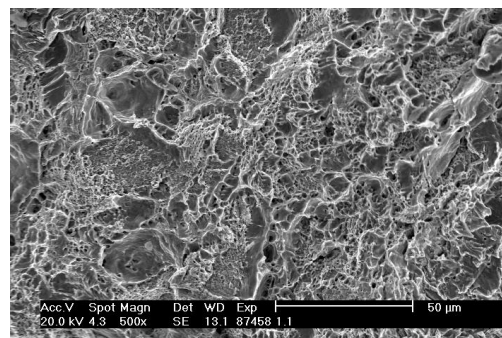
Vzorek 1.1:

Jedná se o vzorek odebraný z oblasti tepelné osy odlitku z vrstvy nejdále od nálitku. K porušení vzorku došlo tvárným lomem s jamkovým mechanismem (cca 80% plochy). Na lomové ploše byly pozorovány řediny. Od řediny se šířilo štěpné porušení ve formě kruhu. Lomová plocha je uvedena na obr. 7.27.

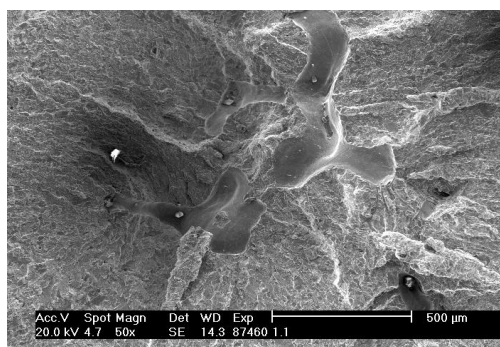
Oblast štěpného porušení je na snímku dole vpravo a menší kruh štěpného porušení dole vlevo. Na *obr. 7.28*. Je uvedena jamková morfologie tvárného porušení při zvětšení 500x. Vlastní ředina je uvedena na *obr. 7.29*. Ředina má na délku 500 až 700 μm .



Obr. 7.27 Přehled lomové plochy.

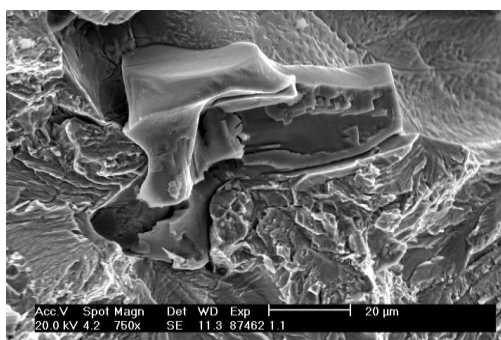


Obr. 7.28 Jamková morfologie tvárného lomu (500x).

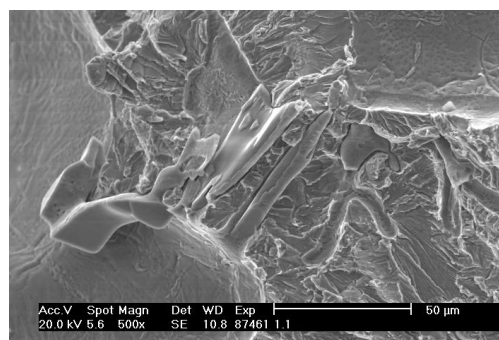


Obr. 7.29 Ředina na lomové ploše.

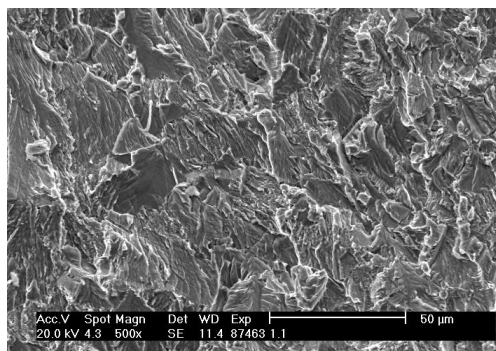
Na lomové ploše byly nalezeny sulfidy. Podle orientace na lomové ploše se jevily sulfidy, buď jako desky uvedené na *obr. 7.30*, nebo jako štíhlé objekty kopírující mezidendritické prostory o velikosti v desítkách μm - *obr. 7.31*. Morfologie štěpného lomu je uvedena na *obr. 7.32*.



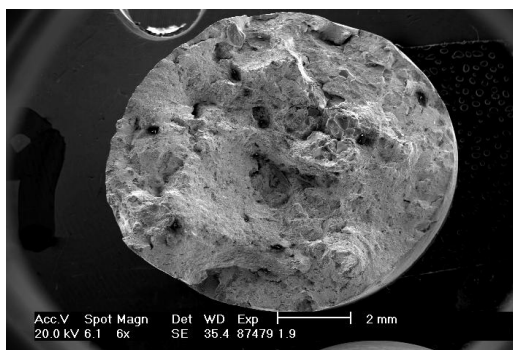
Obr. 7.30 MnS ve tvaru desky.



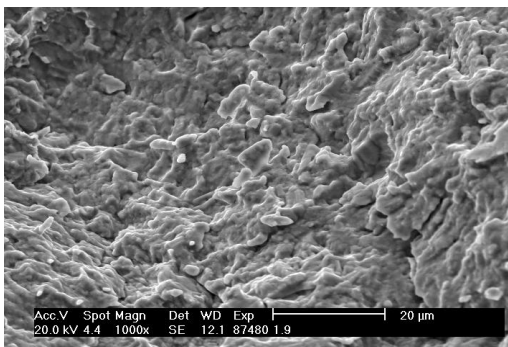
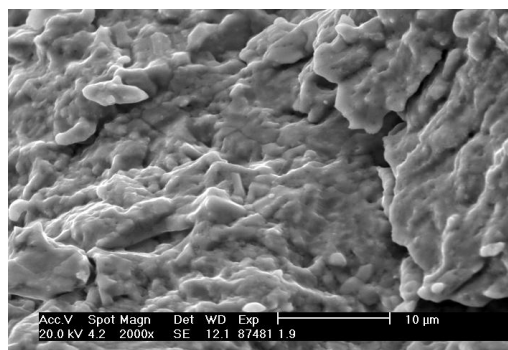
Obr. 7.31 Štíhlé vměstky MnS.

**Obr. 7.32 Morfologie štěpného lomu.****Vzorek 1.9:**

Lomová plocha vzorku 1.9 je znázorněna na obr. 7.33. Jedná se o vzorek z nižší vrstvy pod nálitkem. Uprostřed vzorku se nacházela velká ředina. K porušení vzorku docházelo jednak tvárným, jednak křehkým lomem. Na lomové ploše byla nalezena místa s vyloučeným olovem. Místa měla protáhlý tvar sledující hranice zrn.

**Obr. 7.33 Přehled lomové plochy vz. 1.9.****Vzorek 1.10:**

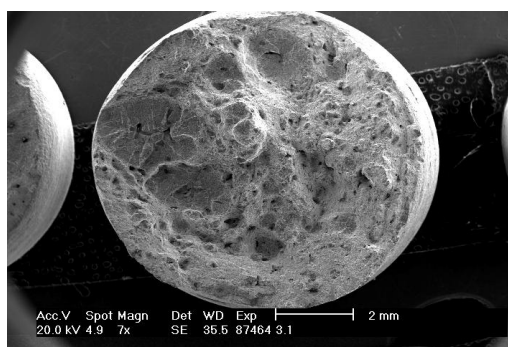
Lomové plochy u vzorků odebraných pod nálitkem (1.10, 3.10 a 6.10) měly podobný charakter lomové plochy jako vzorky z nižší vrstvy (1.9, 3.9 a 6.9). U vzorku 1.10 byl pozorován lom, který nebyl zařazen ani do houževnatého ani do křehkého porušení. Lomové plocha je uvedena na obr. 7.34 a na obr. 7.35. Na lomové ploše se vyskytovaly vměstky podobné jako na ploše 1.9. Morfologie lasturového lomu nebyla pozorována.

**Obr. 7.34 Lom u vzorku 1.10 (1000x).****Obr. 7.35 Lom u vzorku 1.10 (2000x).**

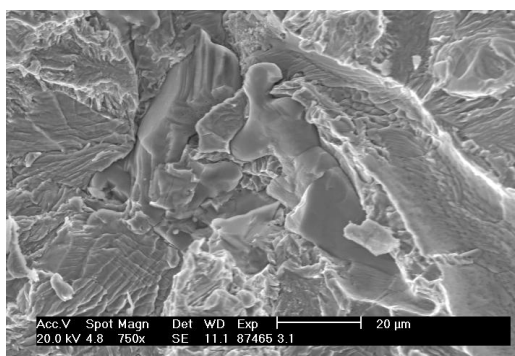
7.3.2 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al + Zr

Vzorek 3.1:

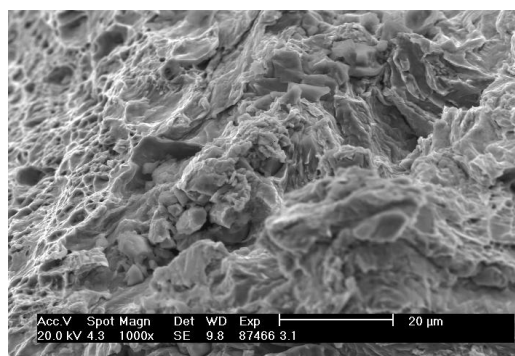
Přehledový snímek lomové plochy vzorku 3.1 je uveden na *obr. 7.36*. Jak bylo uvedeno výše, je to vzorek z oblasti tepelné osy pod nálitkem. Lom na *obr. 7.36* je z větší části houževnatý s jamkovým mechanismem porušení podobným jako u předchozího vzorku na *obr. 7.28* a *obr. 7.29*. Podobné jsou i oblasti křehkého porušení transkrystalickým štěpením šířícím se kruhovitě kolem ředin. Křehký lom přecházel v houževnatý smíšený lom. V okolí ředin se vyskytovaly rovněž velké vměstky MnS podobně jako u předchozího vzorku. Tmavé body na *obr. 7.36* představují velké vměstky IV. typu, kolem nichž se také často vyskytoval křehký lom.



Obr. 7.36 Přehled lomové plochy vz. 3.1.

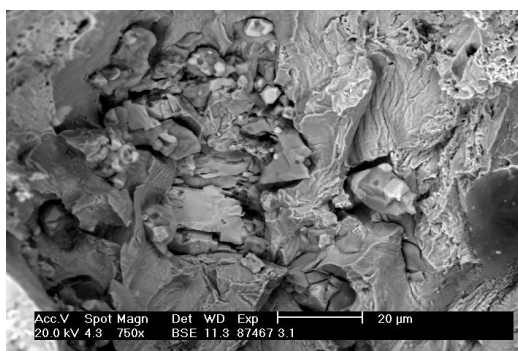


Obr. 7.37 Velký deskovitý sulfid Mn.

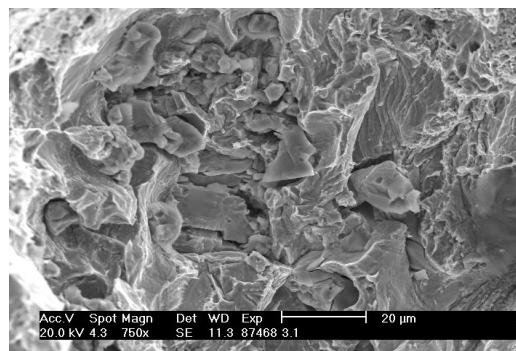


Obr. 7.38 Vměstek IV. typu (Zr-O-S).

Na *obr. 7.37* je uveden příklad velkého sulfidu manganu. Na *obr. 7.38* je uveden vměstek IV. typu. Uvedený typ vměstku se vykytoval na lomové ploše často a obsahoval oxidy a sulfidy zirkonia. Ve vměstcích byl přítomen hořčík až 3 at. % a vápník až 8 at. %. Často se v uvedeném typu vměstků vyskytovalo i kovové zirkonium.



Obr. 7.39 Vměstky IV. typu.

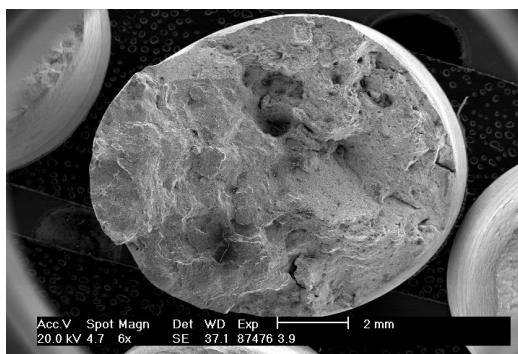


Obr. 7.40 Vměstky IV. typu.

Detaily vměstků IV. typu jsou na *obr. 7.39* a *obr. 7.40*. V detailu jsou vidět kolem vměstku fazety křehkého porušení. Vměstky IV. typu u vzorku 3.1 měly velikost ve stech mikronů a nacházely se v nich i sulfidy manganu.

Vzorek 3.9:

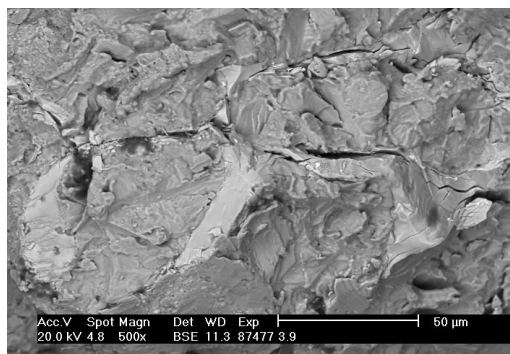
Vzorek 3.9 pochází z oblasti nižší vrstvy pod nálitkem. Lomová plocha vzorku 3.9 je uvedena při zvětšení 6x na *obr. 7.41*. K porušení došlo z 50% tvárným a z 50% štěpným porušením. Na lomové ploše se vyskytoval značný počet vměstků IV. typu. Masivní byl rovněž výskyt krystalů zirkonia s titanem. Analyzovaný krystal obsahoval v jednom případě poměr zirkonia k titanu 1:1. Ve většině krystalů byl obsah titanu jen několik procent. Dále byly analyzovány oxidy obsahující křemík hliník a hořčík. Oxid zirkonia nebyl nalezen.



Obr. 7.41 Přehled lomové plochy vz. 3.9.

Obr. 7.42 Vměstek IV. typu
vměstek MnS.

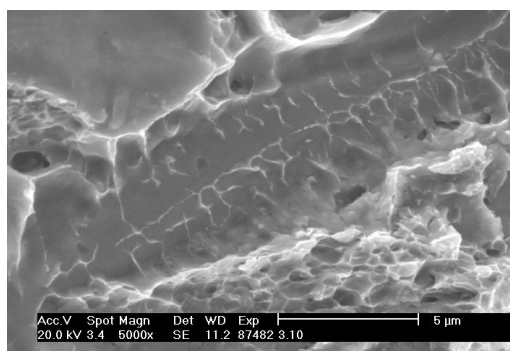
Na *obr. 7.42* je uveden vměstek IV. typu. V pravém rohu dole je vidět část velkého sulfidu manganu a v levém rohu nahoře vyskytují krystaly kovového zirkonia s titanem. Velký vměstek IV. typu je uveden rovněž na *obr. 7.43*.



Obr. 7.43 Velký vměstek IV. typu.

Vzorek 3.10:

Vzorek 3.10 byl odebrán z podnálitkové oblasti kostky č. 3. K porušení vzorku došlo z 60% křehkým mechanismem a z 40% tvárným mechanismem. Na lomové ploše byla nalezena místa s charakterem lasturového lomu. U vzorku 3.10 byl záměrně zvýšen obsah dusíku přes 200 ppm. Na *obr. 7.44* je detail lasturového lomu. Na lasturovém lomu se vyskytovaly částice (plošky) obsahující hliník a dusík v poměru přibližně 1:1

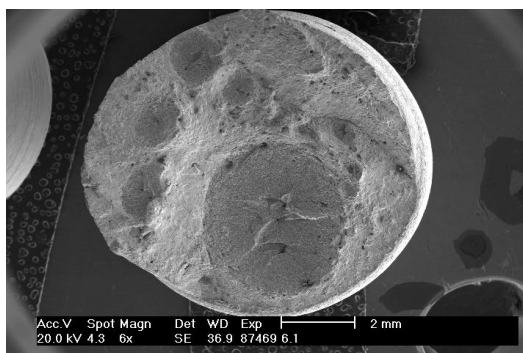


Obr. 7.44 Detail místa s lasturovým lomem.

7.3.3 Výsledky pozorování lomových ploch vzorků dezoxidovaných Al + Ti

Vzorek 6.1:

Jedná se o vzorek ze spodní části odlitku kostky č. 6. Lomová plocha vzorku 6.1 je přehledně uvedena na *obr. 7.45*. K lomu došlo z větší části tvárným porušením. Jako u předchozích vzorků kolem ředin se kruhovitě šířila oblast křehkého porušení traskrystalickým lomem, který přecházel v lom smíšený. Na lomové ploše byly nalezeny velké kulovité vměstky oxidu CaO a sulfidu CaS. Vměstky měly průměr téměř 100 μm. Příklad kulovitého vměstku je na *obr. 7.46*. Na lomové ploše bylo nalezeno velké množství jamek, které odpovídaly velikostí vypadaným vměstkům. V oxidech se nacházel dále Al a Si. Morfologie křehkého porušení je uvedena na *obr. 7.47*.



Obr. 7.45 Přehled lomové plochy vz. 6.1.



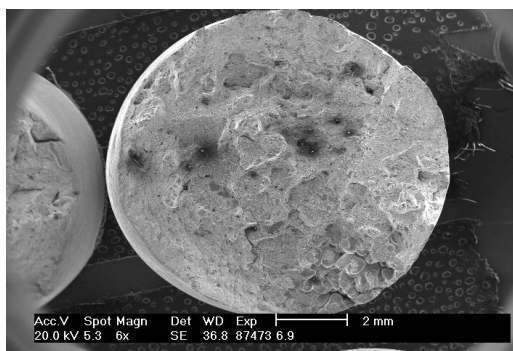
Obr. 7.46 Kulovitý vměstek (Ca-O-S).



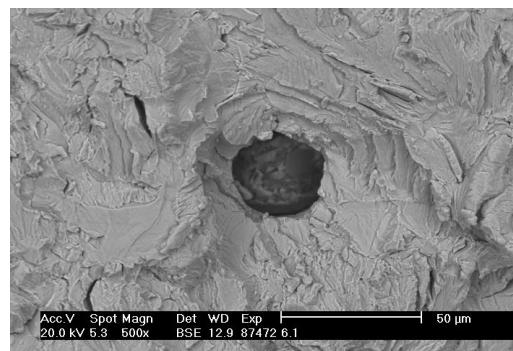
Obr. 7.47 Morfologie štěpného porušení.

Vzorek 6.9:

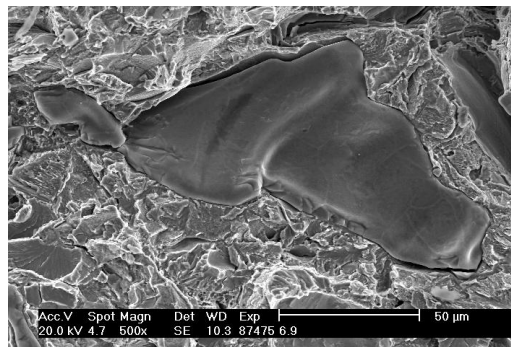
Jak již bylo uvedeno, vzorek 6.9 je z oblasti nižší vrstvy pod nálitkem. K porušení vzorku došlo převážně tvárným lomem (60% tvárného lomu). Dole vpravo se nachází ředina makroskopické velikosti. Kolem řediny byl pozorován štěpný lom. Štěpný lom byl pozorován také kolem velkých vměstků. Štěpný lom přecházel ve smíšený a pak houževnatý. Síra byla vyloučena ve formě velkých sulfidů II. typu. Přehledový snímek lomové plochy je uveden na obr. 7.48. Křehký lom s kulovitým vměstkem je uveden na obr. 7.49. Podobný kulovitý vměstek s oblasti křehkého porušení je uveden na obr. 7.50. Kulovité vměstky obsahovaly oxidy hliníku a křemíku. Místy se vyskytovaly hranaté vměstky oxidu hlinitého. Podobně jako i vzorku 1.1 se nacházely na lomové ploše sulfidy. Na obr. 7.51 je uveden příklad velkého sulfidu MnS. Na vzorku nebyl nikde nalezen charakter lomové plochy, který by odpovídal lasturovému lomu.



Obr. 7.48 Přehled lomové plochy vz. 6.9.



Obr. 7.49 Křehké porušení kolem vměstku (Al-O).

**Obr. 7.50 Kulovitý vměstek (Al-Si-O).****Obr. 7.51 Sulfid manganu.**

7.3.4 Vyhodnocení lomových ploch po tahové zkoušce

U odlitků o hraně 750 mm (nálitek o průměru 700 mm) se vyskytovaly ve všech vzorcích četné mikrořediny až makrořediny. Za makrořediny jsou zde považovány řediny o velikosti největšího rozměru 300 µm. Přítomnost ředin iniciovala křehké štěpení. Na všech lomových plochách byl nalezen houževnatý, smíšený a křehký lom. U vzorků odebraných s krátkou dobou tuhnutí převažoval houževnatý lom, u vzorků s dlouhou dobou tuhnutí lom křehký. Při nízkém obsahu hliníku nebyly na lomové ploše nalezeny lasturové lomy, vyjma vzorku odebraného z odlitku dezoxidovaného zirkoniem a to vz. 6.9. U odlitku dezoxidovaného zirkoniem byl zvýšen obsah dusíku na 213 ppm. Za přítomnosti zirkonia v odlitku vznikaly masivní vměstky IV. typu. Zirkonium se vylučovalo jako samostatná fáze, ve které byl přítomen titan.

7.4 Hodnocení délky trhlin a mechanických vlastností [25]

Cílem hodnocení zkoumaných odlitků bylo ověřit, zda je možné při tavení na EOP zaručit výrobu masivních odlitků z uhlíkových ocelí s obsahem C do 0,25 % bez výskytu lineárních vad pod nálitky při dodržení optimálního obsahu vhodných dezoxidovadel v závislosti na podmínkách tuhnutí.

7.4.1 Výsledky hodnocení délky trhlin a mechanických vlastností

Odlité kostky byly v podnálitkové oblasti pomocí elektromagnetické fluorescenční metody a UZ kontrolovány na výskyt vad. Dále byly hodnoceny mechanické vlastnosti v litém stavu z okraje, 1/4 a 1/2 poloměru nálitku. Pod nálitky byla prováděna kontrola pomocí EMG a UZ, viz obr. 7.52.



Obr. 7.52 NDT na odlitku kostky o hraně 750mm, dezoxidace Al, lito z 1610°C.

Nalezené plochy lineárních vad detekovaných UZ + EMG jsou uvedeny v *tab. 7.21*.

Tab. 7.21 Plochy vad identifikovaných UZ + EMG.

Agregát	Typ dezoxidace	Tavbový obsah N [%]	Tavbový obsah S [%]	Licí teplota [°C]	Plocha útlumu UZ (po TZ) [cm2]	Plocha prasklin (po TZ) [cm2]
EOP	Al 0,015%	0,0112	0,009	1610	928	88
EOP	Al 0,015%	0,0112	0,009	1570	1147	0
EOP	Al0,024%+Zr 0,027%	0,0213	0,012	1570	549	0
EOP	Al0,024%+Zr 0,027%	0,0213	0,012	1610	269	269
EOP	Al0,016%+Ti 0,015%	0,0116	0,007	1570	1331	0
EOP	Al0,016%+Ti 0,015%	0,0116	0,007	1600	406	406
EOP-LF	Al 0,02%	0,0085	0,006	1570	0	0
EOP-LF	Al 0,035%	0,0085	0,006	1570	433	0
EOP-LF-VD	Al 0,019%	0,0047	0,001	1570	0	0
EOP-LF-VD	Al 0,04%	0,0047	0,001	1570	0	0

Z těchto výsledků plyne, že se optimalizací dezoxidace a technologie lití podařilo sice odstranit výskyt lineárních vad detekovaných elektromagnetickou fluorescenční zkouškou na podnátitkových plochách masivních ocelových odlitků, ale zůstal problém s výrazným útlumem UZ vln.

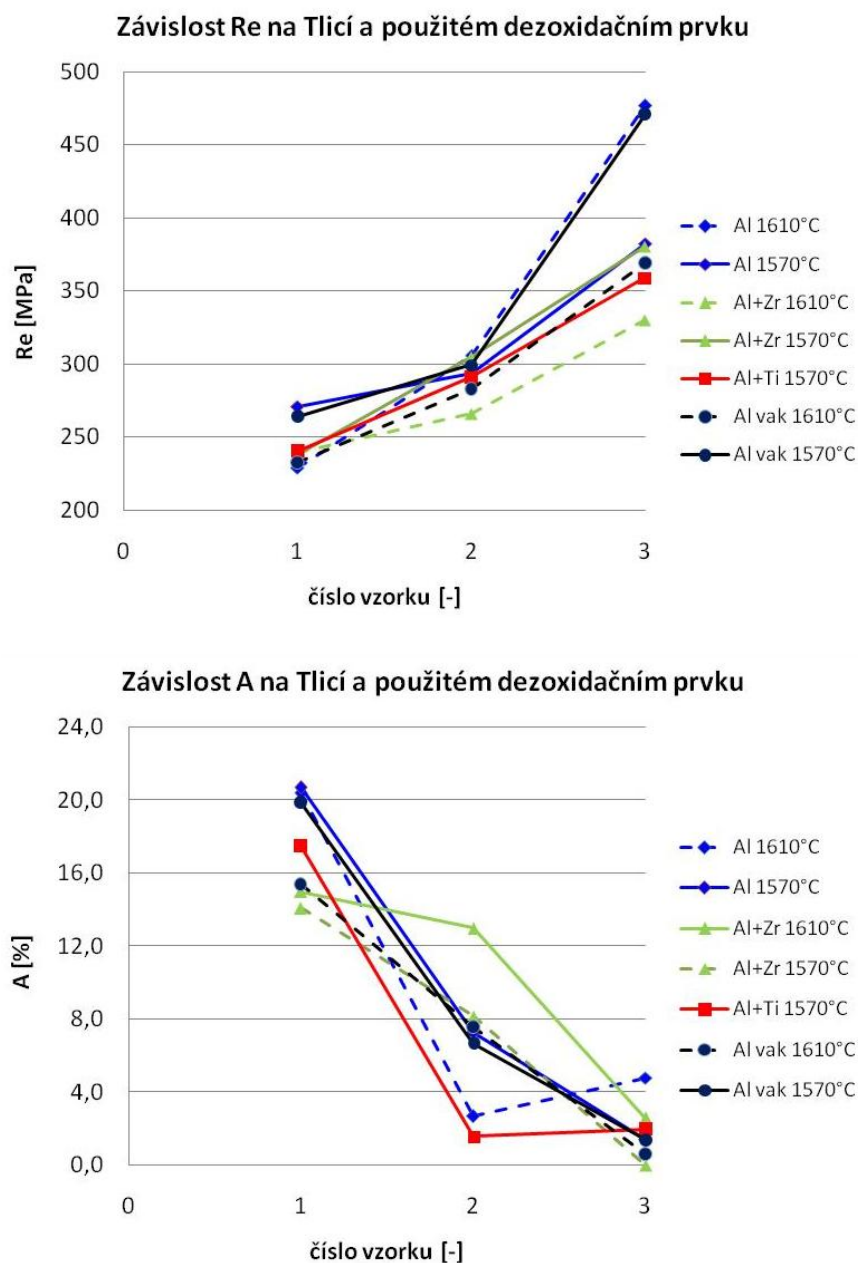
Mechanické vlastnosti zkušebních odlitků v litém stavu jsou uvedeny v *tab. 7.22*. Nálitek z kostky č. 6 byl nedopatřením sešrotován.

Tab. 7.22 Mechanické vlastnosti zkušebních odlitků v litém stavu.

Agregát	Dezoxidace	číslo vzorku	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Pevnost Rm [MPa]	Tažnost A ₅ [%]
EOP	Al 1610°C	1.1	229	442	20,4
		1.2	306	403	2,7
		1.3	477	638	4,8
	Al 1570°C	2.1	239	452	15,0
		2.2	266	490	13,0
		2.3	330	493	2,6
	Al+Zr 1610°C	3.1	271	462	21
		3.2	294	494	7
		3.3	383	467	1
	Al+Zr 1570°C	4.1	238	423	14,1
		4.2	305	474	8,2
		4.3	381	519	0
	Al+Ti 1570°C	5.1	241	458	17,5
		5.2	291	428	1,6
		5.3	359	407	2,0
VD	Al vak 1610°C	7.1	264	476	19,9
		7.2	300	500	6,7
		7.3	471	526	1,4
	Al vak 1570°C	8.1	233	448	15,4
		8.2	283	500	7,6
		8.3	369	386	0,6

Na *obr. 7.54* jsou uvedeny hodnoty meze kluzu a tažnosti pro odlitky tavené na EOP (1 – 6), a odlitky zpracované na VD (7-8). Vzorky pro mechanické zkoušky byly odebrány z nálitku. Mechanické zkoušky byly provedeny v litém stavu.

Jak vyplývá z výsledků uvedených v *obr. 7.54*, byly při dané dezoxidaci stanoveny vyšší hodnoty tažnosti i meze kluzu při odlévání odlitku z nižší teploty. Nejvyšší hodnoty meze kluzu i tažnosti vykazovaly vzorky z odlitků zpracovávané pochodem EOP+VD. Vzorky z odlitků 1 – 6 vykazovaly zpravidla vyšší hodnoty meze kluzu a tažnosti při použití dezoxidace hliníkem. Použití Ti, případně Zr u sledovaných vzorků vedlo ke snížení meze kluzu i tažnosti.



Obr. 7.54 Výsledky hodnocení meze kluzu a tažnosti z nálitků v litém stavu v odlitcích č. 1 – 8.

Součástí hodnocení vlastností materiálu odlitků bylo metalografické hodnocení. Na snímcích *obr. 7.55* jsou zobrazeny místa v materiálu z tepelné osy pod nálitkem. Na snímku *7.55a* jsou zobrazeny vměstky druhého typu po dezoxidaci oceli hliníkem. Na snímku *7.55b* jsou zachyceny vměstky II typu po dezoxidaci oceli Al+Zr. Ve snímku *7.55c* jsou patrné vměstky na bázi Ti. Ze snímků je zřejmé, že se ve vzorcích odebraných z odlitků pod nálitky, tj. v místech ovlivněných segregacemi, při použití EOP vyskytují rozsáhlé vměstky II. a III. typu. Naopak ve vzorcích z odlitků, u kterých byla použita technologie EOP+VD – snímek *7.55d*, se nachází pouze minimum vměstků. Materiál

v místě krčku nálitku má tak větší schopnost odolávat iniciaci a šíření trhlin při upalování nálitků.

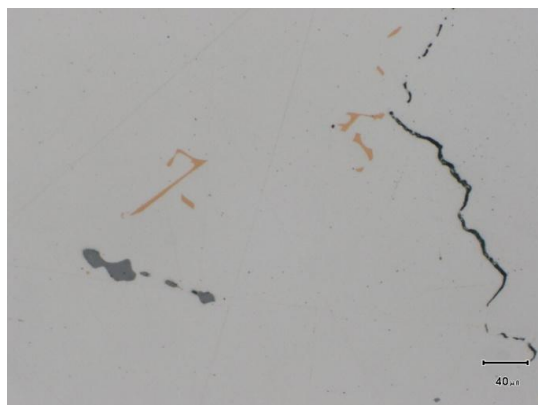
To potvrdily i výsledky hodnocení podnálitkových ploch při kontrole UZ a EMG. U odlitků zpracovaných technologií EOP+VD se vady v podnálitkové oblasti po upálení nálitku nevyskytovaly.



7.55a) Snímek vzorku dez. Al



7.55b) Snímek vzorku dez. Al+Zr



7.55c) Snímek vzorku dez. Al+Ti



7.55d) Snímek vzorku Al zprac. EOP+VD

Obr. 7.55 Metalografie míst z tepelné osy pod nálitkem.

7.4.2 Shrnutí a vyhodnocení délky trhlin a mechanických vlastností

Jak bylo uvedeno výše, z výsledků zkoumání délky trhlin plyne, že se optimalizací dezoxidace a technologie lití podařilo odstranit výskyt lineárních vad na podnálitkových plochách masivních ocelových odlitků.

Největší vliv má použitá dezoxidační přísada na morfologii a velikost vměstků a to zejména v místech s dlouhou dobou tuhnutí, tj. v místech ovlivněných segregačními pochody. V případě dezoxidace oceli pouze Al lze očekávat v místech posledního tuhnutí pod nálitky větších rozměrů (nad cca 500 mm) rozsáhlé vměsky II. typu. Použitím prvků jako Ti nebo Zr lze očekávat

také výskyt většího množství vměstků na bázi Ti (vměstky III. typu) nebo vměstků IV. typu na bázi Zr.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo u experimentálního odlitku v provozních podmínkách stanovit chemické složení a morfologii vměstků v závislosti na způsobu dezoxidace a době tuhnutí. Na základě provedených analýz následně stanovit vliv sledovaných vměstků na charakter porušování materiálu a výsledné mechanické vlastnosti.

Diplomová práce je dílčí součástí projektu TIP č. FR-TI1/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků, řešeného ve slévárně oceli ŽĐAS a.s., Žďár nad Sázavou ve spolupráci s VUT Brno.

Při stanovení morfologie vměstků bylo zjištěno, že v odlitcích žeber s tloušťkou 20 mm se převážně objevovaly vměstky I. typu a sulfidy MnS. Karbidy v těchto vzorcích nebyly analyzovány. Jak se potvrdilo při mikroanalýze vměstků, karbidy se vyskytovaly v odlitcích žeber s tloušťkou stěny 80mm. Převážně se jednalo o karbidy Ti.

Hodnocením lomových ploch bylo zjištěno, že výskyt makroředin a mikroředin byl ve všech vzorcích. Na všech lomových plochách byl také nalezen houževnatý, smíšený a křehký lom. Za přítomnosti Zr v odlitku vznikaly nežádoucí masivní vměstky IV. typu. Při nízkém obsahu hliníku nebyly na lomové ploše analyzovány lasturové lomy, ty se vyskytovaly pouze u vzorku dezoxidovaného Zr.

Dále byly odlité kostky kontrolovány v podnálitkové oblasti pomocí elektromagnetické fluorescenční metody a UZ na výskyt vad. Tady se ukázalo, že se optimalizací dezoxidace podařilo odstranit výskyt lineárních vad na podnálitkových plochách masivních ocelových odlitků. Při zpracování odlitků pochodem EOP+VD nebyly analyzovány žádné lineární vady. Z metalografického hodnocení místa v materiálu z tepelné osy pod nálitkem bylo zjištěno, že v odlitcích, kde byla použita technologie EOP+VD, se nachází pouze minimum vměstků. Materiál v místě krčku nálitku má tak větší schopnost odolávat iniciaci trhlin při upalování nálitků. Při hodnocení mechanických vlastností bylo zjištěno, že nejvyšších hodnoty mechanických vlastností vykazovaly vzorky z odlitků zpracované pochodem EOP+VD. Použití Ti, případně Zr, vedlo u sledovaných vzorků ke snížení mechanických vlastností.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ELBEL, T., aj. Vady odlitku ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s
- [2] ŠENBERGER, J., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., STRÁNSKÝ, K., KAFKA, V. *Metalurgie oceli na odlitky*. VUTIUM, Brno 2008.
- [3] LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K., *Metalurgické vady ocelových odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
- [4] *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací* [online]. 2009 [cit. 2010-05-14]. Projekt FR-TI1/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků (2009-2012, MPO/FR). Dostupné z WWW: <<http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI1%2F070>>.
- [5] ŽDAS a.s. [online]. 2007 [cit. 2010-03-17]. Metalurgie. Dostupné z WWW: <<http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?catid=93>>.
- [6] *Železiarne Podbrezová a.s. - home page* [online]. 2009 [cit. 2010-04-17]. Ročné správy. Dostupné z WWW: <[http://www.zelpo.sk/zelpo/homezp.nsf/4A65084CE819A7F6C12575E100239133/\\$File/RocnaSprava2008.pdf](http://www.zelpo.sk/zelpo/homezp.nsf/4A65084CE819A7F6C12575E100239133/$File/RocnaSprava2008.pdf)>.
- [7] MARTÍNEK, Ludvík; FILA, Pavel; BALCAR, Martin. Současný stav a perspektivy rozvoje výroby elektrooceli ve ŽDAS, a.s.. *Hutnické listy*. 2001, LV, 10, s. 9-12.
- [8] MARTÍNEK, Ludvík; SOCHOR, Stanislav; FILA, Pavel . Modernizace ocelárny ŽDAS, a.s.. *Slévárenství*. 1996, 6, s. 388-392.
- [9] BALCAR, Martin; MARTÍNEK, Ludvík; FILA, Pavel. Charakteristika současných základních metalurgických postupů s využitím prvků sekundární metalurgie v elektroocelárně divize Metalurgie ŽDAS, a.s.. *Hutnické listy*. 2001, LV, 10, s. 13-17.
- [10] BALCAR, Martin, et al. Technologické procesy při výrobě oceli : Pánvová metalurgie. In BALCAR, Martin, et al. *XIX. celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem*. Žďár nad Sázavou : Česká slévárenská společnost, 2009. s. 46-60. ISBN 978-80-02-02179-7.
- [11] MARTÍNEK, Ludvík, et al. Sekundární metalurgie ve slévárnách. *Slévárenství*. 2006, 6, s. 218-221.
- [12] *SMS MEVAC UK - Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Ladle Furnace. Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/ladle-furnace.htm>>.

[13] SMS MEVAC UK - *Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Ladle Degasser with Oxygen Blowing. Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/ladle-degasser.htm>>.

[14] SMS MEVAC UK - *Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Vacuum Oxygen Decarburisation (VOD). Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/vacuum-oxygen-decarburisation.htm>>.

[15] KLVÁČEK, J. *Výroba masivních ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

[16] PTÁČEK, L a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. 2003. ISBN 80-7204-283-1.

[17] Vliv chemického složení a kinetiky krystalizace na tvorbu sulfidických vměstků v ocelích. In FRANCOVA, H., et al. *5. mezinárodní konference metalurgie a materiálů* [online]. Hradec nad Moravicí : METAL, 2006 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2006/sbornik/papers/125.pdf>>.

[18] *Metalurgie oceli* [online]. 2006 [cit. 2011-05-23]. Vliv dezoxidace na morfologii vměstků. Dostupné z WWW: <http://metalurgie-oceli.webz.cz/2_7_4.html>.

[19] BŮŽEK, Z., SCHINDLEROVÁ, V.: Zpřesnění Simsovy klasifikace typů siřičových vměstků vznikajících v ocelích na odlitky. *Slévárství*, roč. 20, č. 10, 1972 s. 409-413.

[20] ROUČKA, J. *Příručka o filtraci*. 1. vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2000. 41 s., ISBN 80-02-01389-1.

[21] ZÁDĚRA, A., *Metalurgie*. Přednáška. Brno: VUT Brno, 30.4.2013.

[22] BŮŽEK, Z.; KOSŇOVSKÝ, Z. : Lasturový lom těžkých odlitků. *Sborník přednášek – Mezinárodní vědecká konference VŠB- Technická univerzita Ostrava*, 1995, str. 109-113.

[23] PLUCHÁČEK, J.; KUBOŇ, M. : Možnosti potlačení působení nitridů AlN v masivních ocelových odlitcích pomocí tepelného zpracování. *Perspektivy slévárství*, číslo K 444, rok 1997, str. 183-186.

[24] KAŇÁK, Jan; SAIP, Jiří. Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost ocelových odlitků. *Slévárství*. 1984, 10, s. 420-424.

[25] ZÁDĚRA, A., ČECH, J., ŠENBERGER, J. Vliv sekundární metalurgie na vlastnosti ocelových odlitků. *Dílčí zpráva projektu TIP č. FR-TI/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků*, VUT Brno, 2012.

[26] ČECH, J., ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A. Výroba masivních odlitků z uhlíkových ocelí. *Dílčí zpráva projektu TIP č. FR-TI/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků*, VUT Brno, 2012.

[27] *Vysoká škola chemicko - technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2012-05-10]. Metalografie 1. Dostupné z [www: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)

[28] ŠENBERGER, J. Vyhodnocení lomových ploch po tahové zkoušce odlitků 3. série. *Dílčí zpráva projektu TIP č. FR-TI/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků*, VUT Brno, 2012.